

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Davor Šercer

Zagreb, 2016.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Mentor:

Doc. dr. sc. Ivan Stojanović, dipl. ing.

Student:

Davor Šercer

Zagreb, 2016.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći stečena znanja tijekom studija i navedenu literaturu.

Posebno se zahvaljujem mentoru doc. dr. sc. Ivan Stojanoviću i svim djelatnicima Laboratorija za zaštitu materijala na savjetima i velikoj pomoći tijekom izrade ovog diplomskog rada.

Zahvaljujem se svojoj obitelji i prijateljima na podršci i razumijevanju iskazanom tijekom mog dugogodišnjeg studiranja.

Davor Šercer



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite
Povjerenstvo za diplomske ispite studija strojarstva za smjerove:
proizvodno inženjerstvo, računalno inženjerstvo, industrijsko inženjerstvo i menadžment, inženjerstvo
materijala i mehatronika i robotika

Sveučilište u Zagrebu	
Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum 29-06-2016	Prilog
Klasa: 602-04/16-6/3	
Ur.broj: 15-1703-16-216	

DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **Davor Šercer**

Mat. br.: 0035157994

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Zaštita energetskog transformatora premazima**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Coating protection of power transformer**

Opis zadatka:

Energetski transformatori izloženi su različitim eksploatacijskim uvjetima koji smanjuju njihovu učinkovitost i trajnost. Zaštita od korozije premazima je osnovna metoda zaštite čeličnih konstrukcija, pri čemu zaštitne prevlake redovito moraju biti otporne i na druge vrste oštećivanja materijala.

U radu je potrebno obraditi zaštitu od korozije premazima, prikazati njihova svojstva, vrste i područje primjene. Potrebno je detaljnije izučiti smjernice za odabir sustava premaza za zaštitu energetskih transformatora ovisno o korozivnosti okoliša i trajnosti zaštite. U jednoj od hrvatskih tvrtki snimiti i u radu prikazati tehnologiju zaštite energetskih transformatora premazima.

U eksperimentalnom dijelu rada potrebno je nanijeti sustav premaza za zaštitu energetskog transformatora na pločice od niskougljičnog konstrukcijskog čelika. Nakon sušenja, u slanoj i vlažnoj komori potrebno je ispitati zaštitna svojstva odabranog sustava premaza. Dati ocjenu učinkovitosti zaštite.

Zadatak zadan:

5. svibnja 2016.

Rok predaje rada:

7. srpnja 2016.

Predviđeni datum obrane:

13., 14. i 15. srpnja 2016.

Zadatak zadao:

Stojanović

Doc. dr. sc. Ivan Stojanović

Predsjednik Povjerenstva:

Cajner

Prof. dr. sc. Franjo Cajner

SADRŽAJ

SADRŽAJ	II
POPIS SLIKA	IV
POPIS TABLICA.....	VI
POPIS KRATICA	VII
POPIS OZNAKA	VIII
SAŽETAK.....	IX
SUMMARY	X
1. UVOD.....	1
2. OŠTEĆIVANJE KONSTRUKCIJSKOG MATERIJALA	2
2.1. Kemijsko oštećivanje	2
2.2. Fizikalno oštećivanje.....	2
2.2.1. Mehaničko oštećivanje.....	2
2.2.1.1. Kavitacijsko oštećivanje	3
2.2.1.2. Oštećivanje trenjem	3
2.2.2. Toplinsko oštećivanje	3
2.3. Biološko oštećivanje	4
3. EKONOMSKO ZNAČENJE KOROZIJE	5
4. KLASIFIKACIJA KOROZIJSKIH PROCESA.....	6
4.1. Prema mehanizmu djelovanja	7
4.1.1. Kemijska korozija	7
4.1.2. Elektrokemijska korozija	8
4.2. Prema geometrijskom obliku korozijskog razaranja.....	10
4.2.1. Opća korozija	10
4.2.2. Lokalna korozija	11
4.2.2.1. Pjegasta korozija	12
4.2.2.2. Rupičasta korozija.....	12
4.2.2.3. Potpovršinska korozija.....	13
4.2.2.4. Kontaktna korozija.....	13
4.2.3. Selektivna korozija.....	15
4.2.4. Interkristalna korozija	15
5. METODE ZAŠTITE METALA OD KOROZIJE.....	16
5.1. Metode zaštite prevlakama.....	17
5.2. Elektrokemijske metode zaštite	17
5.2.1. Katodna zaštita.....	18
5.2.2. Anodna zaštita.....	19
5.3. Zaštita metala obradom korozivne sredine	20
6. NANOŠENJE ORGANSKIH PREVLAKA	21
6.1. Priprema podloge za prevlačenje	22
6.1.1. Odmašćivanje.....	22
6.1.2. Mehanička priprema podloga.....	23

6.2.	Tehnologije nanošenja premaza	25
6.3.	Organski premazi, podjela i sastav	26
7.	ODABIR SUSTAVA PREMAZA	29
7.1.	Uvod.....	29
7.2.	Sustav premaza	29
7.2.1.	Temeljni premaz	30
7.2.2.	Međupremaz	31
7.2.3.	Završni premaz.....	31
7.3.	Mehanizam zaštitnog djelovanja premaza učinkom barijere	32
7.4.	Odabir sustava premaza	33
7.4.1.	Korozivnost okoliša	34
7.4.2.	Zaštita premazima konstrukcija izloženih atmosferskim uvjetima.....	34
8.	TEHNOLOGIJA ZAŠTITE KUĆIŠTA ENERGETSKIH TRANSFORMATORA	37
8.1.	Odabir sustava premaza za zaštitu energetskih transformatora	37
8.1.1.	Epoksidni premaz (EP)	38
8.1.2.	Poliuretanski premaz (PUR)	38
8.2.	Priprema površine	38
8.3.	Priprema premaza	40
8.4.	Nanošenje premaza	41
9.	KOROZIJA TRANSFORMATORA U EKSPLOATACIJI	43
10.	EKSPERIMENTALNI RAD.....	45
10.1.	Značenje ispitivanja zaštitnih premaza	45
10.2.	Plan ispitivanja.....	46
10.3.	Određivanje hrapavosti sačmarene površine.....	47
10.4.	Mjerenje debljine suhog filma premaza.....	48
10.5.	Ispitivanje sjaja premaza.....	49
10.6.	Ispitivanje tvrdoće premaza	50
10.7.	Ispitivanje otpornosti premaza na udar	51
10.8.	Ispitivanje u slanoj komori.....	53
10.8.1.	Ispitivanje širenja korozije ispod premaza.....	55
10.9.	Ispitivanje u vlažnoj komori	56
10.10.	Ispitivanje prionjivosti premaza – "Cross-cut" test.....	58
10.11.	Ispitivanje vlačne čvrstoća premaza – "Pull-off" test	60
10.12.	Analiza rezultata	62
11.	ZAKLJUČAK.....	63
	LITERATURA.....	64
	PRILOZI.....	65

POPIS SLIKA

Slika 1.	Prikaz energetskog transformatora [1]	1
Slika 2.	Primjer kemijskog oštećivanja atmosferskom korozijom [5].....	2
Slika 3.	Primjer mehaničkog kavitacijskog oštećivanja [5]	3
Slika 4.	Primjer biološkog oštećivanja [5].....	4
Slika 5.	Shematski prikaz kemijske korozije vrućim oksidirajućim plinovima [5].....	8
Slika 6.	Shematski prikaz elektrokemijske korozije [5]	9
Slika 7.	Opća korozija [5].....	11
Slika 8.	Pjegasta korozija [5].....	12
Slika 9.	Rupičasta korozija [7]	13
Slika 10.	Potpovršinska korozija [5].....	13
Slika 11.	Galvanska korozija nelegiranog čelika (cijevna stijena) u dodiru s nehrđajućim čelikom (cijev) [7]	14
Slika 12.	Shematski prikaz korozije u procjepu [5].....	14
Slika 13.	Selektivna korozija, decinkacija mjedi [5]	15
Slika 14.	Interkristalna korozija [5].....	15
Slika 15.	Načini katodne zaštite [5].....	19
Slika 16.	Podjela prevlaka prema karakteru tvari [5]	21
Slika 17.	Pucanje premaza nakon zatezanja vijka [9]	29
Slika 18.	Peteroslojni sustav premaza, ukupne debljine najčešće od 360 do 600 μm [2]	30
Slika 19.	Učinak barijere [2].....	32
slika 20.	Učinak nepropusnih listićavih pigmenata u premazu [2].....	33
Slika 21.	Kategorija korozivnosti i primjer okruženja [2].....	35
Slika 22.	Sustavi premaza za niskougljični čelik za korozivnost okoliša C2-C5 [2]	36
Slika 23.	Stanje površine kućišta nakon ispitivanja na nepropusnost sapunicom,	39
Slika 24.	Stanje površine kućišta nakon sačmarena, Komet d.o.o. [1].....	40
Slika 25.	Alat za strojno miješanje boje [1].....	40
Slika 26.	Nanošenje premaza valjcima na teško dostupnim mjestima [1]	41
Slika 27.	Nanošenje premaza bezračnim postupkom [1]	41
Slika 28.	Epoksidni temeljni premaz i međupremaz [1]	42
Slika 29.	Izgled završnog poliuretanskog premaza, Komet d.o.o. [1].....	42
Slika 30.	Loše izvedeni zavarivački radovi [9]	43
Slika 31.	Loše konstrukcijsko rješenje [9].....	43
Slika 32.	Korozija u procjepu između temelja i dna transformatora [9]	44
Slika 33.	Atmosferska korozija na oštrom bridu [9]	44
Slika 34.	Atmosferska korozija uslijed pucanja premaza [9]	44
Slika 35.	Prikaz ispitnih uzoraka [10]	46
Slika 36.	Uzorak 18 i uređaj Elcometer 224 za mjerenje hrapavosti površine [10]	47
Slika 37.	Uređaj Elcometer 456 za mjerenje debljine prevlake [10].....	48
Slika 38.	Uređaj Glossmeter TQC GL0030 20°/60°/80° za mjerenje sjaja prevlake [10] ...	49
Slika 39.	Određivanje nijanse premaza prema RAL-u [10]	50
Slika 40.	Ispitivanja tvrdoće [10]	51
Slika 41.	Uređaj Elcometer 1615 za mjerenje otpornosti na udar [10]	52
Slika 42.	Prikaz uzorka 10 nakon ispitivanja otpornosti na udar [10].....	52
Slika 43.	Slana komora Ascott S450, Laboratorij za zaštitu materijala, FSB Zagreb [10] ..	53
Slika 44.	Prikaz položaja uzoraka 2, 8 i 13 u slanoj komori [10].....	53

Slika 45.	Prikaz uzoraka 2 i 8 nakon 480 sati ispitivanja u slanoj komori [10]	54
Slika 46.	Prikaz uzorka 13 nakon 480 sati ispitivanja u slanoj komori [10]	55
Slika 47.	Vlažna komora i uzorci u njoj [10]	56
Slika 48.	Prikaz pripremljenih uzoraka 14, 16 i 17 za vlažnu komoru [10]	57
Slika 49.	Prikaz uzoraka 14, 16 i 17 nakon 240 h ispitivanja u vlažnoj komori [10]	57
Slika 50.	Postupak ispitivanja prionjivosti premaza [10]	58
Slika 51.	Uređaj Elcometer 108 za ispitivanje vlačne čvrstoće premaza [10]	61

POPIS TABLICA

Tablica 1. Značajke srednjetrojnog eksploatacijskog vijeka sustava premaza S3.17 [12].....	37
Tablica 2. Popis odabranih premaza	37
Tablica 3. Popis odabranog premaznog sustava korištenog u eksperimentalnom dijelu	45
Tablica 4. Plan ispitivanja uzoraka	46
Tablica 5. Izmjerene vrijednosti hrapavosti sačmarene površine na uzorku 18.....	47
Tablica 6. Izmjerene vrijednosti debljine premaza na svim uzorcima	48
Tablica 7. Izmjerene vrijednosti sjaja premaza na uzorku 19	49
Tablica 8. Rezultati ispitivanja širenja pukotine ispod premaza	55
Tablica 9. Ocjene prionjivosti	58
Tablica 10. Ispitivanje prionjivosti, uzorak 12, etalon [10]	59
Tablica 11. Ispitivanje prionjivosti, uzorci 2, 8 i 13, nakon slane komore [10].....	59
Tablica 12. Ispitivanje prionjivosti, uzorci 14, 16 i 17, nakon vlažne komore [10]	60
Tablica 13. Rezultati ispitivanja vlačne čvrstoće premaza	61

POPIS KRATICA

NAZIV KRATICE	ZNAČENJE KRATICE
NACE	Natinal Association of Corrosion Engineers
SAD	Sjedinjene Američke Države
BDP	Bruto domaći proizvod
EP	Epoksid
PUR	Poliuretan
MIOX	Micaceous Iron Oxide Pigment

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
DSF	μm	Debljina suhog filma
Ry5	μm	Srednja vrijednost hrapavosti površine
M	mm	Širina korozije koja je zahvatila površinu ispod premaza
c	mm	Ukupna širina korozije koja je zahvatila ispitno područje
w	mm	Širina skalpela kojim se urezao premaz

SAŽETAK

U ovome radu prikazane su metode zaštite energetskih transformatorskih kućišta primjenom kombinacije epoksidnog i poliuretanskog premaza, prednosti i nedostaci i područje primjene.

Diplomski rad se sastoji od teorijskog i eksperimentalnog dijela.

U teorijskom dijelu je obrađeno oštećivanje materijala, klasifikacija korozija i metode zaštite od korozije premazima koje se danas koriste u zaštiti strojarских konstrukcija i postrojenja. Posebno je obrađen odabir sustava zaštite transformatora, te epoksidni i poliuretanski premaz, jer se kombinacija tih premaza koristi u eksperimentalnom dijelu ovoga rada.

U eksperimentalnom dijelu ispitan je sustav zaštite općih konstrukcijskih čelika od korozije kombinacijom epoksidnih i poliuteranskih premaza. Nizom ubrzanih ispitivanja kao što su slana i vlažna komora, mjerenje debljine premaza i prionjivosti, određeno je zaštitno djelovanje premaza.

Priprema površine i nanošenje premaza provedeno je u tvrtki Komet d.o.o., dok su sva laboratorijska ispitivanja provedena na Katedri za zaštitu materijala, Fakulteta strojarstva i brodogradnje u Zagrebu.

Ključne riječi: korozija, energetski transformator, premazi, epoksid, poliuretan.

SUMMARY

This thesis shows the methods of protection of power transformer casing using a combination of epoxy and polyurethane coatings, advantages and disadvantages and scope.

The thesis consists of theoretical and experimental part.

The theoretical part deals with corrosion, corrosion classification, methods of corrosion protection, coatings that are used in the protection of mechanical structures and facilities, as well as the selection of the paint system for the protection of transformers, epoxy and polyurethane coating, because the combination of this coatings is used in the experimental work.

The experimental part deals with protection system of structural steel from corrosion by a combination of epoxy and polyurethane coatings. In a series of accelerated tests such as the salt fog and humidity chamber, the measurement of thickness and adhesion strength, the protective effect of the coating was determined.

Surface preparation and coating application took place in the company Komet LLC, while all laboratory tests was carried out at the Chair of Materials Protection, Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture in Zagreb.

Key words: corrosion, power transformer, coatings, epoxy, polyurethane.

1. UVOD

Energetski transformatori su standardni dijelovi sustava za distribuciju električne energije. Transformatori (slika 1.) se uglavnom sastoje od jezgre i kućišta koje ima funkciju da nosi, hladi i štiti jezgru od vanjskih utjecaja. Ljudi su okruženi transformatorima, ima ih svugdje, na raznim mjestima, raznim podnebljima, tj. raznim utjecajima okoline na koroziju kućišta transformatora. Iz ekonomskog aspekta ugrađeni materijali u kućišta su uglavnom opći konstrukcijski čelici kvalitete S235 do maksimalno S355. Zbog ugrađene kvalitete čelika i utjecaja okoline, možemo klasificirati da je kućište pod utjecajem atmosferske korozije. Atmosferska korozija je posebno jaka u industrijskim zonama i u primorskim predjelima.



Slika 1. Prikaz energetskog transformatora [1]

U gradskoj atmosferi opći konstrukcijski čelik korodira brzinom od 0,2 mm/god. Materijal je upotrebljiv ako korodira manjom brzinom od 0,1 mm/god. U protivnom, potrebno je primijeniti odgovarajuću metodu zaštite od korozije [2].

Zaštita kućišta transformatora od korozije organskim prevlakama je osnovna metoda zaštite tih proizvoda. Primjenom određenih metoda zaštite od korozije kao što su organske prevlake u obliku epoksidnih i poliuretanskih premaza ostvaruje se korozijska zaštita konstrukcija, smanjuju se troškovi održavanja i produljuje njihov vijek trajanja.

2. OŠTEĆIVANJE KONSTRUKCIJSKOG MATERIJALA

Da bi došlo do određene pojave ili procesa oštećivanja konstrukcijskog materijala, mora u promatranom sustavu postojati kemijska, mehanička, biološka ili neka druga pokretačka sila. Ona je uzrok štetne pojave ili procesa oštećivanja, pa je brzina oštećivanja razmjerna pokretačkoj sili. Njezinu se djelovanju, međutim, opiru fizikalni i kemijski otpori kojima je brzina oštećivanja obrnuto proporcionalna. Veličina pokretačke sile ili otpora ovise o unutarnjim i vanjskim faktorima oštećivanja [3].

2.1. Kemijsko oštećivanje

Kemijsko oštećivanje (slika 2.) konstrukcijskog materijala mogu izazvati vlažna atmosfera, oborine, vlažno tlo, slatka i morska voda, vodene otopine kiselina, lužina, soli i drugih tvari, taline spojeva, vrući plinovi, neprikladna maziva, organske tekućine itd. Pri tome se konstrukcijski materijal kemijski mijenja, tj. korodira. Promjene počinju od površine i razvijaju se prema unutrašnjosti [4].



Slika 2. Primjer kemijskog oštećivanja atmosferskom korozijom [5]

2.2. Fizikalno oštećivanje

2.2.1. Mehaničko oštećivanje

Među fizikalnim vrstama oštećivanja najčešće je mehaničko oštećivanje konstrukcijskog materijala. Materijal je uvijek opterećen mehaničkim silama koje izazivaju naprezanja (vlačno, tlačno, savijanje, smicanje, torzija i izvijanje) a time i deformacija, elastičnih i plastičnih. Može doći do iniciranja pukotina koje vode ka lomu materijala [4].

2.2.1.1. Kavitacijsko oštećivanje

Kavitacijsko oštećivanje (slika 3.) osobit je oblik mehaničkog oštećivanja materijala. Ono je srodno eroziji jer se zbiva u struji tekućine, ali se događa samo kada zbog brzih i znatnih promjena tlaka naglo nastaju i nestaju mjehurići pare tekućine. To se zbiva u vrlo brzim turbulentnim strujama tekućina ili zbog naglih promjena brzine strujanja tekućine [4].



Slika 3. Primjer mehaničkog kavitacijskog oštećivanja [5]

2.2.1.2. Oštećivanje trenjem

Na mehaničko oštećivanje materijala utječe i trenje koje može uzrokovati površinsko trošenje materijala odvajanjem sitnih čestica bez kemijskih promjena. Trošenje materijala trenjem dijeli se na abraziju (trenje čvrstog tijela po čvrstom tijelu) i eroziju (trošenje trenjem čvrstog tijela i pokretnih fluida) [4].

2.2.2. Toplinsko oštećivanje

Toplinsko oštećivanje također se ubraja u fizikalne vrste oštećivanja koje se najčešće pojavljuje pri visokim temperaturama ili uz nagle promjene temperatura. Opasne su i visoke i niske temperature. S toplinskim oštećivanjem povezano je i starenje materijala, tj. promjena mehaničkih i drugih svojstava u dužem vremenskom razdoblju zbog različitih fizikalnih i kemijskih promjena [4].

2.3. Biološko oštećivanje

Izravna biološka oštećenja (slika 4.) izazivaju prije svega mikroorganizmi i to aerobnim ili anaerobnim procesima, ali i makroorganizmi. U prvom redu biološkom su oštećivanju izloženi organski konstrukcijski materijali (drvo, polimeri, guma), ali nekim biološkim procesima (npr. octeno kiselim vrenjem) nastaju uvjeti koji uzrokuju i koroziju metala. Različite morske životinje, mikroorganizmi i makroorganizmi (alge, školjke, puževi), nastanjuju podvodne dijelove brodova, smanjujući im brzinu i uništavajući podvodne boje, čime omogućuju koroziju podvodnih trupova [4].



Slika 4. Primjer biološkog oštećivanja [5]

Može se zaključiti da su problemi korozije vrlo složeni i njihovo rješavanje zahtijeva temeljito proučavanje svih kemijskih, fizikalnih i bioloških faktora koji djeluju na proces korozije i najužu suradnju stručnjaka različitih profila (kemičara, strojara, građevinara, električara, biologa itd.) [4].

3. EKONOMSKO ZNAČENJE KOROZIJE

Korozija je danas jedan od važnih čimbenika svjetske krize materijala i energije, uzrok je znatnih gubitaka u gospodarstvu svake zemlje [5].

Korozija smanjuje masu i upotrebnu vrijednost materijala. Ona uzrokuje skraćenje vijeka trajanja industrijske i druge opreme te različitih proizvoda, poskupljuje održavanje, uzrokuje zastoje u radu pogona, havarije i nesreće, smanjuje proizvodne kapacitete korodirane i s njom povezane opreme, pogoršava kvalitetu proizvoda, onečišćuje okoliš, medij, smanjuje efikasnost i iskoristivost proizvoda itd. Zbog svega toga u pojedinom poduzeću, privrednoj grani ili u privredi kao cjelini nastaju golemi gubici. Oni mogu biti izravni i neizravni. Neizravni gubici obično premašuju izravne gubitke jer korozija na jednom stroju često poremeti cijeli proizvodni proces, tj. rad mnogih strojeva, i to ne samo u istom poduzeću, nego i u drugim, tehnološko povezanim, poduzećima [4].

Izravni troškovi izazvani korozijom [5]:

- zamjena korodirane opreme
- održavanje
- provođenje zaštite.

Neizravni troškovi izazvani korozijom [5]:

- zaustavljanje proizvodnje/pogona
- gubitak proizvoda (npr. curenje iz tankova)
- smanjenje stupnja iskoristivosti – efikasnosti
- onečišćenje/kontaminacija proizvoda
- predimenzionirane konstrukcije.

Prema istraživanju NACE-a (National Association of Corrosion Engineers), 2003. godine u SAD-u, ukupni troškovi korozije iznose 3,1% BDP-a, a to je 276 milijardi američkih dolara, što iznosi 1000 američkih dolara godišnje po stanovniku [5].

4. KLASIFIKACIJA KOROZIJSKIH PROCESA

Procesi korozije klasificiraju se prema [6]:

1. Mehanizmu djelovanja:
 - kemijska korozija
 - elektrokemijska korozija.
2. Geometrijskom obliku korozijskog razaranja:
 - opća korozija
 - lokalna korozija:
 - pjegasta korozija
 - rupičasta korozija
 - napetosna korozija
 - potpovršinska korozija
 - kontaktna:
 - galvanska korozija
 - korozija u procjepu korozija
 - mikrobiološki poticana korozija
 - selektivna korozija
 - interkristalna korozija.

4.1. Prema mehanizmu djelovanja

4.1.1. *Kemijska korozija*

Kemijska korozija je posljedica kemijskih reakcija između metala i okoline, koja se zbiva u neelektrolitima (medijima koji ne provode električnu struju).

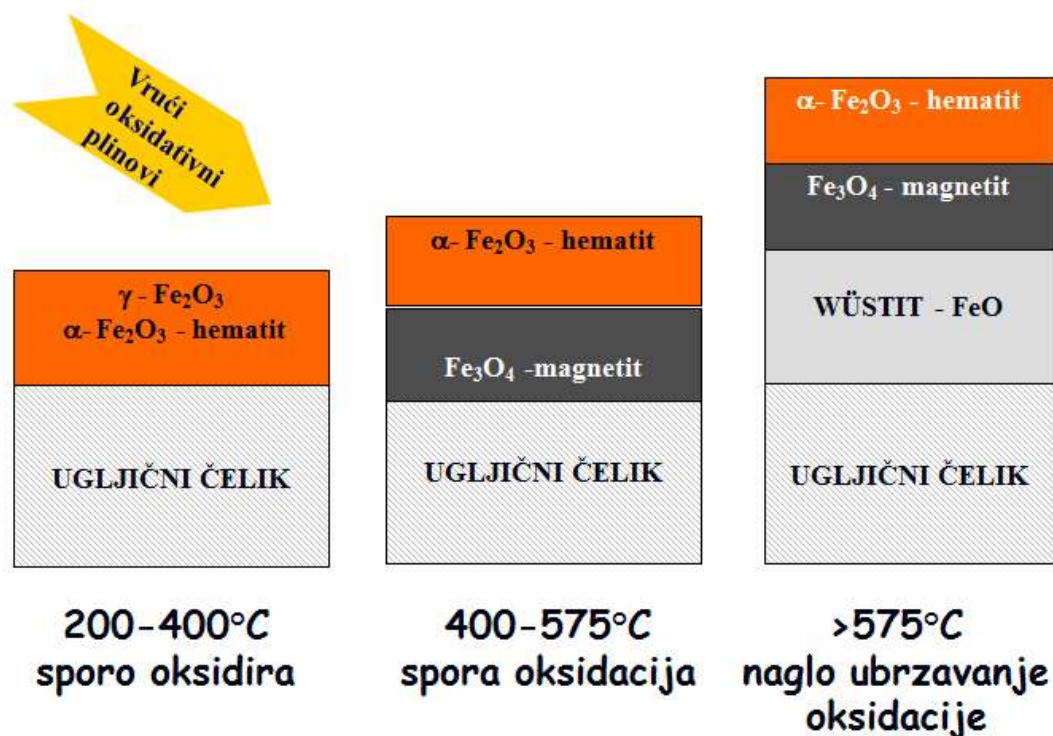
Kemijska korozija metala je reakcija atoma metala iz kristalne rešetke, najčešće s molekulama nemetala, pri čemu nastaju molekule spoja (najčešće oksidi i sulfidi) koje su korozijski produkt. Ova će reakcija teći samo ako između spomenutih reaktanata postoji afinitet kojim se kvantitativno izražava kao težnja tvari da međusobno spontano reagiraju. Brzina i tok korozije ovise o afinitetu i o otporima koji se suprotstavljaju tom procesu. Sustav u kojem postoji afinitet među reaktantima, procesa korozije nije u kemijskoj ravnoteži i upravo korozijom teži prema njoj. Ako se afinitet i otpori tijekom vremena ne mijenjaju, tijek korozije je linearan, a brzina korozije konstantna. Često se otpori mijenjaju s vremenom čime se usporava ili ubrzava brzina korozije [4].

Afinitet, općenito, za kemijsku koroziju metala ovisi o vrsti procesa, o koncentracijama (parcijalnim tlakovima) reaktanata u okolini i o temperaturi [4].

Otpori odvijanju kemijske korozije su najčešće niska energijska razina reaktanata i zaštitna svojstva čvrstih korozijskih produkata. Energija aktivacije reaktanata mora biti dovoljna za svladavanje aktivacijske barijere pri sudaru molekule kisika s atomom na površini metala. Povišenjem temperature povećava se brzina molekula plina što objašnjava ovisnost brzine kemijske reakcije metala o temperaturi [4].

Najvažniji neelektroliti koji u praksi izazivaju kemijsku koroziju metala svakako su vrući plinovi i organske tekućine.

Kemijska korozija u vrućim oksidirajućim plinovima (slika 5.) teče samo uz uvjet da su ti plinovi suhi, tj. da zbog visoke temperature na metalu ne mogu nastati ni tekuća voda ni vodena otopina, bilo kondenzacijom bilo adsorpcijom, jer čim dođe do jedne od tih pojava, odvija se elektrokemijska korozija. Plinska korozija najčešće teče u vrućem zraku i u sagorijevanim plinovima. Do nje može doći kod vruće obrade metala, u pirometalurškim i termoenergetskim postrojenjima, u industrijskim pećima, u motorima s unutarnjim izgaranjem i sl. [4].



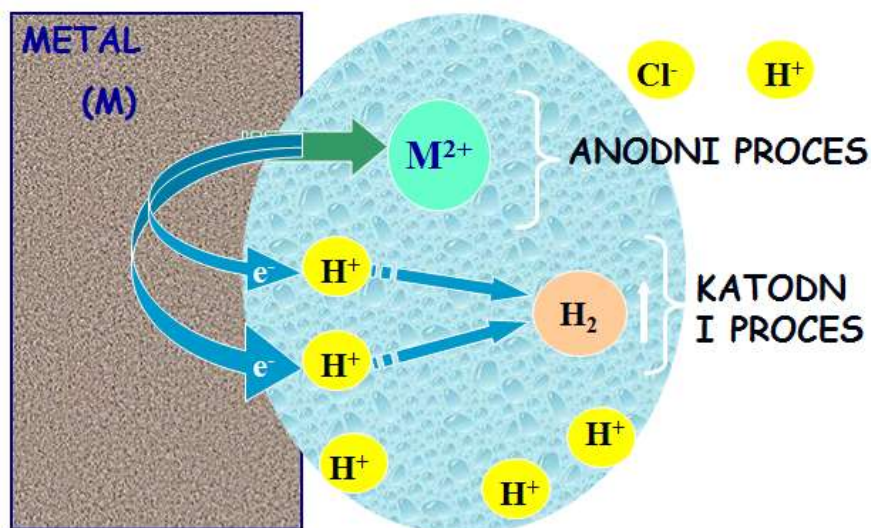
Slika 5. Shematski prikaz kemijske korozije vrućim oksidirajućim plinovima [5]

Organske tekućine mogu izazvati kemijsku koroziju samo ako su bezvodne jer inače dolazi do elektrokemijske korozije. Najvažnije su bezvodne tekućine nafta i njezini derivati, otapala za odmašćivanje i razrjeđivanje lakova i boja, te otopine neioniziranih tvari u takvim tekućinama. Ova vrsta korozije u tehnici najčešće nastaje djelovanjem maziva na dijelove strojeva [4].

4.1.2. Elektrokemijska korozija

Elektrokemijska korozija je najrašireniji oblik korozije metala. Više od 95 % korozije metala nastaje zbog elektrokemijskih reakcija između metala i okoliša [6].

Elektrokemijska korozija metala (slika 6.) zbiva se u elektrolitima, tj. u medijima s ionskom vodljivošću (koji provode električnu struju). To je redoks proces pri kojemu dolazi do oksidacije atoma metala kao reducensa (donora elektrona) u slobodni kation uz istodobnu redukciju nekog oksidansa, tzv. depolarizatora (akceptora elektrona). Elektrokemijska korozija se odvija u prirodnoj i tehničkoj vodi, u vodenim otopinama kiselina, lužina, soli i drugih tvari, u vlažnom tlu, u sokovima biološkog porijekla, u talinama soli, oksida i hidroksida te u atmosferi [4].



Slika 6. Shematski prikaz elektrokemijske korozije [5]

Procesi koji prate elektrokemijsku koroziju [5]:

1. Anodni proces (oksidacija ili ionizacija materijala) (1)

- otapanje metala
- stvaranje viška elektrona



Katodni proces (redukcija ili vodikova depolarizacija)

- trošenje elektrona

a) redukcija ili vodikova depolarizacija (kisele otopine) (2)



b) redukcija ili kisikova depolarizacija (neutralne i lužnate otopine) (3)



2. Sumarni anodni i katodni proces vodikove depolarizacije (4)



3. Sumarni anodni i katodni proces kisikove depolarizacije (5)



Elektroliti sadrže:

- Katione: Na^+ , Ca^{2+} , H^+ , Fe^{2+} itd.
- Anione: Cl^- , NO_3^- , OH^- , SO_4^{2-} itd.

Temeljni uvjet za odvijanje procesa elektrokemijske korozije je prisutnost elektrolita. Tanki nevidljivi film elektrolita stvara se na metalnoj površini izložen atmosferskim uvjetima kada je postignut određeni kritičan nivo vlažnosti. U praksi, zbog prisutnosti higroskopskih čestica, nečistoća u atmosferi, za čelik dovoljna je vlažnost od 60 % da se stvori mikroskopski površinski elektrolit [4].

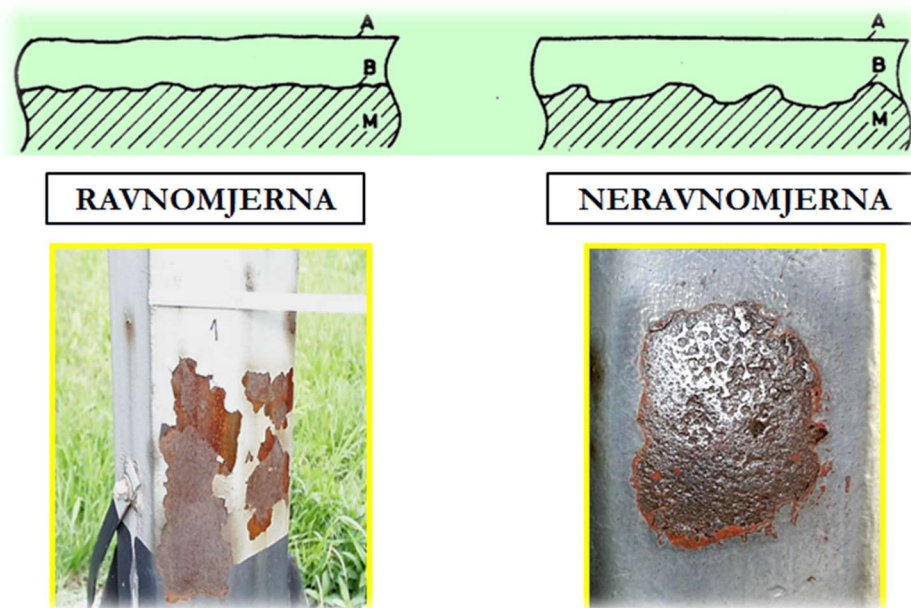
4.2. Prema geometrijskom obliku korozijskog razaranja

Prema geometrijskom obliku korozijskog razaranja, korozija se dijeli na opću, lokalnu, selektivnu i interkristalnu koroziju [4].

4.2.1. Opća korozija

Opća korozija (slika 7.) zahvaća čitavu površinu materijala, a može biti ravnomjerna ili neravnomjerna. Ravnomjerna opća korozija tehnički je najmanje opasna jer se proces može lako pratiti i predvidjeti kada treba određeni dio popraviti ili ga zamijeniti s novim. Neravnomjerna opća korozija je puno opasnija. Do opće korozije dolazi kada je čitava površina materijala izložena agresivnoj sredini pod približno jednakim uvjetima s obzirom na unutrašnje i vanjske faktore korozije [4].

Karakter opće korozije obično ima plinska korozija metala te atmosfersko hrđanje čelika i patiniranje bakra, bakrenih legura, nikla i srebra na otvorenom prostoru [4].



Slika 7. Opća korozija [5]

U gradskoj atmosferi opći konstrukcijski čelik korodira brzinom od 0,2 mm/god dok u razrijeđenoj sulfatnoj atmosferi (sumpornoj) kiselini brzina korozije iznosi i do 10 mm/god. Čelik u atmosferi zbog različitih vodenih otopina, kondenzirajućih i suhih plinova korodira to jače što je viši udio (%) ugljika. Aluminij u gradskoj atmosferi korodira brzinom od 0,013 mm/god dok korozijski postojani visokolegirani Cr-Ni čelici do 0,005 mm/god [2].

Materijal je upotrebljiv ako korodira manjom brzinom od 0,1 mm/god. U protivnom, potrebno je primijeniti odgovarajuću metodu zaštite od korozije [2].

Načini zaštite od opće korozije jesu [2]:

- legiranje, tj. dodavanje više od 0,2 %Cu niskougljičnim čelicima
- izbor korozijski postojanih čelika
- prevlačenje organskim prevlakama
- galvansko prevlačenje (cinčanje, kositrenje, kromiranje, niklanje, itd.)
- dodavanjem inhibitora korozije u okolni medij
- elektrokemijske metode zaštite.

4.2.2. Lokalna korozija

Lokalna korozija zahvaća samo neke dijelove izložene površine. Lokalna korozija može biti pjegasta, koja je ograničena na pojedine veće dijelove metalne površine, ili točkasta koja je usko lokalizirana na žarišta približno kružnog presjeka.

Iako je gubitak materijala neznatan, u usporedbi s općom korozijom, lokalna korozija daleko je opasnija od opće korozije, jer je lokalni proces teže kontrolirati, pa često dolazi do iznenadnih havarija.

4.2.2.1. Pjegasta korozija

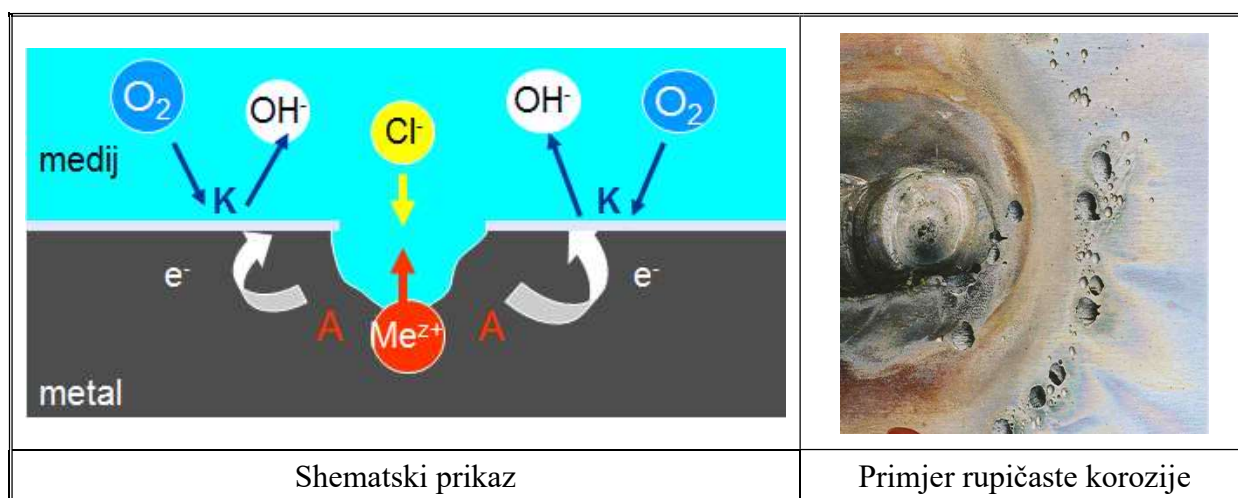
Pjegasta korozija (slika 8.) zahvaća plitko samo anodna mjesta na metalnoj površini i ostavlja karakteristične pjege po površini metala što rezultira neestetskim izgledom metala. Lako je uočljiva i nije toliko opasna [6].



Slika 8. Pjegasta korozija [5]

4.2.2.2. Rupičasta korozija

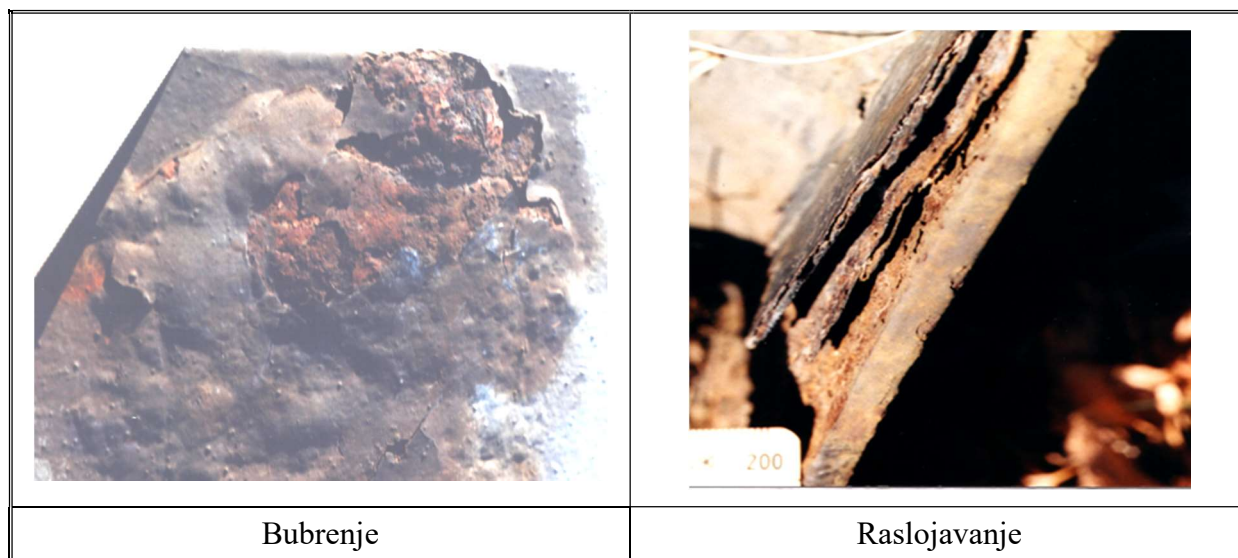
Postoje mnogi nazivi za ovu koroziju, kao što su jamičasta, točkasta, igličasta, piting (eng. pitting, nastajanje udubina). Rupičasta korozija (slika 9.) jedna od najopasnijih oblika korozije. Djeluje neobično destruktivno jer prodire duboko u materijal, perforacija samo jednog pita može dovesti do pucanja konstrukcije. To je usko lokalizirana korozija pri kojoj su zahvaćeni ekstremno mali dijelovi metalne površine, dok je ostali dio površine nenapadnut. Ovoj vrsti korozije podliježu brojni metali kao nehrđajući čelik, nikal, aluminij, magnezij, željezo, bakar, cink, te njihove legure i to najčešće u kloridnim elektrolitima [6].



Slika 9. Rupičasta korozija [7]

4.2.2.3. Potpovršinska korozija

Potpovršinska ili slojevita korozija (slika 10.) se javlja u nekim slučajevima, kada se žarišta pittinga šire u dubini materijala raslojavajući ga. Najraširenija je na valjanim metalima u dodiru s morskom vodom i s kiselinama. Na površini materijala često nastaju mjehuri jer se u njegovoj unutrašnjosti gomilaju čvrsti korozijski produkti kojima je volumen veći od volumena uništenog metala [4].



Slika 10. Potpovršinska korozija [5]

4.2.2.4. Kontaktna korozija

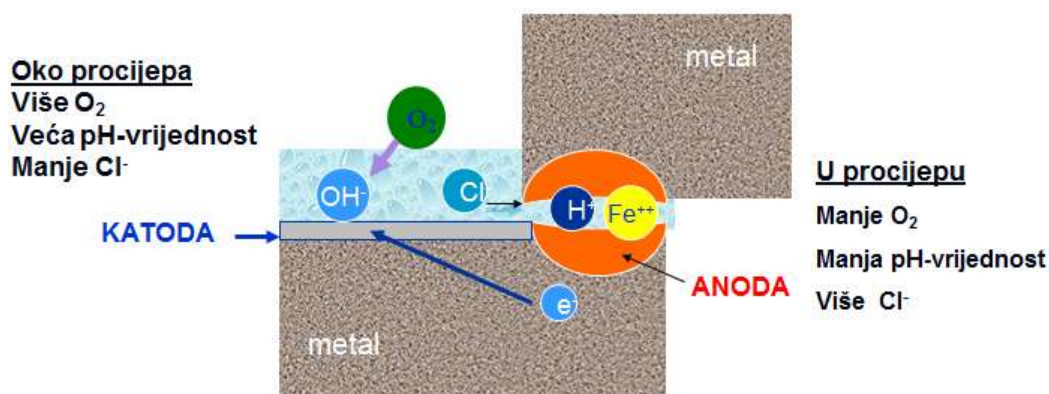
Poseban oblik korozije pri dodiru dvaju dijelova u elektrolitu. Ako su ti dijelovi od različitog materijala dolazi do galvanske kontaktne korozije ili bimetalne korozije, a ako se radi o dijelovima od istog materijala ili metala i nemetala, dolazi do korozije u procjepu [4].

Galvanska korozija (slika 11.) se javlja kada su dva metala sa različitim električnim potencijalima u dodiru, u elektrolitu koji provodi električnu struju. Sustav koji zadovoljava navedene uvjete formirat će elektrokemijsku vezu koja će provoditi električnu struju. Jedan metal otpušta elektrone i ponaša se kao anoda, a suprotan metal, katoda, prima elektrone. Galvanska korozija je najveća u blizini površine kontakta. Smanjenje sklonosti galvanskoj koroziji postiže se odabirom materijala jednakih potencijala.



Slika 11. Galvanska korozija nelegiranog čelika (cijevna stijena) u dodiru s nehrđajućim čelikom (cijev) [7]

Korozija u procijepu (slika 12.) srodna je rupičastoj koroziji. U uskom procijepu formira se anodno područje, zbog slabe pristupačnosti dolazi do manjka kisika, stvaranje okoline manje pH vrijednosti, te povećanje klorida. Neposredno izvan procjepa formira se katodno područje. Smanjenje sklonosti koroziji u procijepu postiže se izbjegavanjem uskih procijepa pri konstruiranju, izbjegavanje naslaga, katodnom zaštitom, izbjegavanjem stagnacije medija, omogućavanjem drenaže [4, 5].



Slika 12. Shematski prikaz korozije u procijepu [5]

4.2.3. *Selektivna korozija*

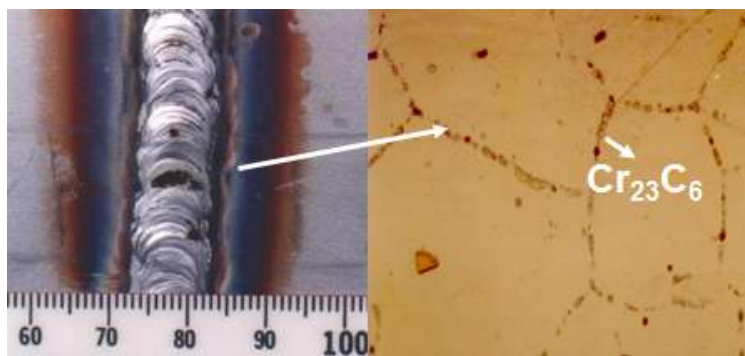
Imamo faznu (ferit, austenit itd.) i komponentnu (cink itd.) selektivnu koroziju. Selektivna korozija (slika 13.) napada samo jednu (ili neke) od faza ili komponenti višefaznog ili višekomponentnog materijala. Fazna selektivna korozija može biti samo na višefaznim materijalima, kao što je grafitizacija sivog lijeva. Komponentna selektivna korozija obično se pojavljuje na višekomponentnim materijalima, kao što je decinkacija mjedi. Neke komponente/faze legure su elektrokemijski aktivnije i anodno se otapaju u galvanskom kontaktu s plemenitijim komponentama/fazama. Selektivna korozija ne mijenja toliko volumen, koliko smanjuje čvrstoću i duktilnost neke legure [4, 5].



Slika 13. Selektivna korozija, decinkacija mjedi [5]

4.2.4. *Interkristalna korozija*

Interkristalna korozija (slika 14.) razara materijal na granicama zrna (kristala) i vrlo je opasan oblik korozije jer može dugo ostati neprimijećena šireći se u dubinu, a naglo smanjuje čvrstoću i žilavost materijala. Konačna posljedica interkristalne korozije je lom [4].



Slika 14. Interkristalna korozija [5]

5. METODE ZAŠTITE METALA OD KOROZIJE

Metode zaštite metala od korozije temelje na primjeni dvaju načela koja proizlaze iz teorije o koroziji:

- smanjenje ili poništenje afiniteta za proces korozije i
- povećanje otpora koroziji.

Oba se ova načela mogu iskoristiti na više načina u metodama zaštite, najčešći su:

1. Promjenom unutarnjih faktora korozije (sastava, teksture, oblika materijala, tehničkih i drugih fizikalnih svojstva).
2. Promjenom vanjskih faktora korozije (smanjenje koncentracije kisika pomoću inhibitora, promjene tlaka, temperature, električnog naboja, radijacije, prisutnost mikroorganizama i makroorganizama).
3. Elektrokemijske metode zaštite (metal se održava ili u pasivnom ili u imunom stanju).
4. Metode zaštite metalnim ili nemetalnim prevlakama.

Borba protiv kemijske korozije, koja u prvim redovima teče u vrućim oksidirajućim plinovima, može se provesti smanjenjem ili poništenjem afiniteta, i to zamjenom uobičajenih konstrukcijskih materijala metala plemenitim metalima. Tako se npr. srebro, zlato, platina i silikatna keramika upotrebljavaju u vrućim oksidirajućim plinovima jer nemaju afiniteta prema njima. Smanjenje ili nestanak afiniteta za kemijsku koroziju postiže se i zamjenom ili obradom agresivne sredine. Vrući oksidirajući plinovi mogu se zamijeniti zaštitnim plinovima, što se često primjenjuje u metalurgiji ili u preradi materijala na visokim temperaturama [4].

Borba protiv elektrokemijske korozije može se realizirati smanjenjem afiniteta, tj. smanjenjem razlike elektrodnih potencijala katode i anode ($E_k - E_a$). Taj se afinitet može smanjiti povišenjem elektrodnog potencijala anode ili sniženjem elektrodnog potencijala katode [4].

5.1. Metode zaštite prevlakama

Prevlakama se razdvaja konstrukcijski materijal od agresivnog djelovanja okoliša. Metalne i nemetalne zaštitne prevlake i premazi su najčešći oblik zaštite od korozije. Primarna zadaća prevlaka je zaštita od korozije dok je sekundarna zadaća prevlaka zaštita od mehaničkog trošenja, postizanje estetskog dojma, postizanje određenih fizikalnih svojstava površine i dr. Zaštitno djelovanje prevlake ovisi o njoj vrsti, debljini, stupnju kompaktnosti i čvrstoći prijanjanja. Za kvalitetno nanošenje premaza i prevlaka potrebno je dobro pripremiti površinu što znači da je nužno ukloniti nečistoće, masnoću, te produkte korozije.

Metalne prevlake nanose se fizikalnim ili kemijskim postupcima metalizacije ili platiranja, već prema tome odvijaju li se pri prevlačenju samo fizikalne promjene ili su prevlake produkt kemijskih reakcija. Tu spadaju galvanizacija ili elektroplatiranje, metalizacija prskanjem, vruće uranjanje u talinu metala, platiranje, nataljivanje, navarivanje itd. [3].

Nemetalne anorganske prevlake nanose se fizikalnim ili kemijskim postupcima. Fizikalno se takve prevlake obično nanose izvana, tj. bez sudjelovanja podloge. Kemijski se prevlake najčešće oblikuju procesom u kojem sudjeluje površina podloge. Od najbitnijih tu spadaju emajliranje, eloksiranje, bruniranje te fosfatne prevlake [3].

Nemetalne organske prevlake su prevlake koje se dobiju nanošenjem organskih premaznih sredstava (bojenjem i lakiranjem), uobičajenim podmazivanjem, plastifikacijom, gumiranjem i bitumenizacijom [3].

5.2. Elektrokemijske metode zaštite

Danas se elektrokemijska zaštita upotrebljava kao zaštita ukopanih ili uronjenih metalnih konstrukcija, tj. koje nisu lako pristupačne za održavanje zaštitom premazima kao što su cjevovodi, lučka postrojena, brodovi, rezervoari, kondenzatori, izmjenjivači topline itd.

Elektrokemijskim metodama zaštite metal se održava u pasivnom stanju ili u imunom stanju. Ovisno o načinu polarizacije, elektrokemijska zaštita može biti:

- katodna (snižavanje elektrodnog potencijala) ili
- anodna (povišenje elektrodnog potencijala).

5.2.1. Katodna zaštita

Katodna zaštita je jedna od najznačajnijih metoda zaštite od korozije u elektrolitima. Obično se koristi kao sekundarni zaštitni sustav, koji počinje djelovati nakon oštećenja primarnog (npr. premaza). Temelji se na usporavanju korozije katodnom polarizacijom metala tj. pomakom elektrokemijskog potencijala metala u negativnom smjeru. U praksi se upotrebljavaju dva načina katodne zaštite [5, 6]:

- Katodna zaštita u kojoj je zaštićeni predmet katodno polariziran djelovanjem vanjskog izvora istosmjerne struje (negativnog polariteta).
- Katodna zaštita u kojoj se katodna polarizacija ostvaruje kontaktom zaštićenog metala s manje plemenitijim metalom – žrtvovanom anodom (protektorom).

Oba načina temelje se na istoj teoriji, izbor načina ovisi o funkciji konstrukcije. Općenito se kod stacionarnih objekata (npr. cjevovod) koristi zaštita s vanjskim izvorom struje, dok se protektori koriste na pokretnim objektima (npr. brodovi) ili na mjestima gdje prijeti opasnost da iskra izazove požar [4].

Na površini metala koji se katodno (negativno) polarizira nastaje višak elektrona koji ubrzava katodnu reakciju, a usporava anodnu reakciju otapanja metala.

Uspostavljanjem sustava katodne zaštite s vanjskim izvorom, metal se spaja na negativni pol izvora istosmjerne struje, tako da se na granici faza konstrukcije i elektrolita, uspostavlja razlika potencijala (elektrodni potencijal), pri kojoj se na cijeloj površini konstrukcije odvija katodna reakcija, dok se anodna reakcija odvija na protuelektrodi – anodi. Anode za ovaj sustav zaštite mogu biti topljive i netopljive. Topljive su najčešće od konstrukcijskog ugljičnog čelika, a netopljive se izrađuju od ferosilicija, grafita, magnetita, nikla, olova, platiniranog titana itd. Potpuno su netopljive samo platinirane, dok se ostale, ipak, polako troše. Prednost čeličnih anoda je niska cijena, a nedostatak topljivost, dok su grafitne anode trajnije, ali lako lomljive [6].

Kod sustava katodne zaštite žrtvovanom anodom (protektorom), konstrukcija se spaja sa elektrodom od materijala koji je elektronegativniji nego što je materijal konstrukcije. Žrtvovana se anoda nakon spajanja počinje otapati, a na konstrukciji se uspostavlja elektrodni potencijal pri kojem se odvija katodna reakcija – površina konstrukcije postaje katoda.

Prilikom rada ovakvog sustava, anode se troše te ih je potrebno povremeno mijenjati. Katodna zaštita je djelotvorna jedino ako postoji vodljivi medij između protektora i konstrukcije koja se štiti. Za zaštitu čeličnih konstrukcija rabe se protektori od cinka, magnezija, aluminija i njihovih legura. Tehnički se cink lako pasivira korozijskim produktima, što bitno smanjuje zaštitnu struju. Zato se kao protektor rabi rafinirani cink ili njegove legure s malo aluminija ili magnezija [6].

Na slici 15. možemo vidjeti oba načina katodne zaštite.



Slika 15. Načini katodne zaštite [5]

5.2.2. Anodna zaštita

Anodna polarizacija metala, provodi se samo kod onih, koji se mogu pasivirati. Slično katodnoj zaštiti i anodna zaštita metala se provodi na dva načina:

- izvorom istosmjerne struje (spajanjem sa pozitivnim polom istosmjerne struje)
- protektorom (spajanjem sa elektropozitivnijim metalom).

Kod anodne istosmjerne struje korozija čelika se smanjuje održavanjem u području pasivacije. Anodna zaštita djeluje upravo u tom ograničenom području potencijala, pa je pri izvedbi najznačajnije određivanje područja potencijala u kojem se metal nalazi u pasivnom stanju.

Zaštita metala primjenom katodnog protektora može se ostvariti ukoliko je korozijski potencijal protektora pozitivniji od potencijala pasiviranja metala. Za čelik se mogu kao katodni protektori koristiti plemeniti metali (platina, paladij, srebro, bakar) ili grafit. Za anodnu zaštitu nije dovoljno spajanjem s katodnim protektorom učiniti korozijski potencijal pozitivnijim, nego je neophodno pomaknuti korozijski potencijal metala u područje pasivnog stanja. Prije izvođenja anodne zaštite potrebno je laboratorijski odrediti gustoću struje pasiviranja i područje pasiviranja u ovisnosti o uvjetima korozijske sredine (pH, temperatura, sastav i koncentracija, brzina strujanja elektrolita itd.) [6].

Anodna se zaštita zbog svojih ograničenja (ograničen broj materijala na kojima se može primijeniti) i skupe instalacije potencioštata ne koristi često. Najviše se primjenjuje u kemijskoj industriji [4].

5.3. Zaštita metala obradom korozivne sredine

Brzina korozije metala u otopinama koje se ne obnavljaju može se smanjiti obradom korozivne sredine. Te metode obrade korozivne sredine mogu se primjenjivati za zaštitu izmjenjivača topline, parnih kotlova, kondezatora, kada za dekapiranje te cisterni za držanje i transport kiselina i drugih agresivnih otopina [4].

Smanjenje korozivnosti vanjske sredine koja djeluje na metale može se provesti na dva načina:

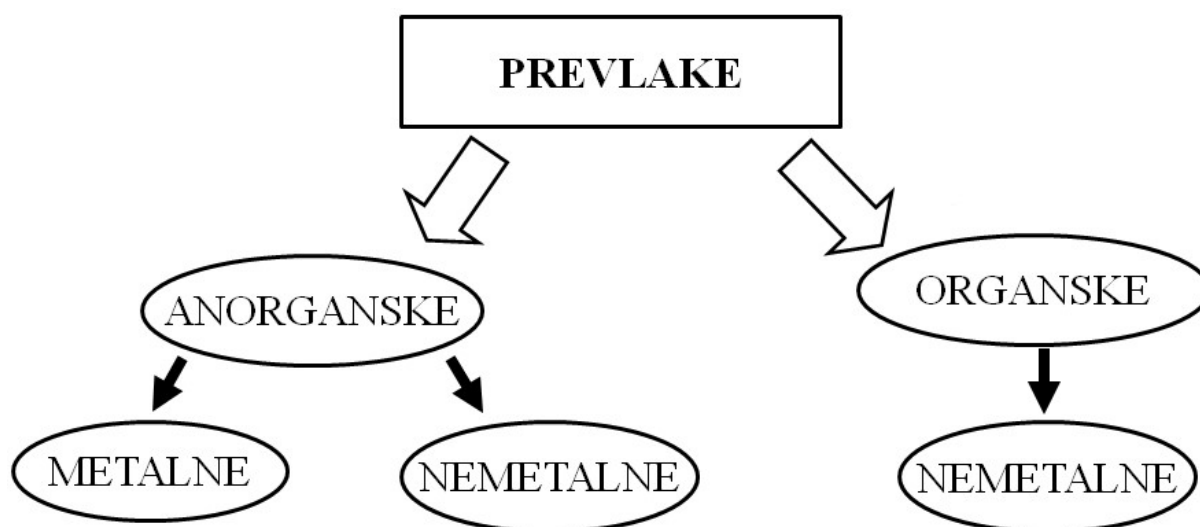
- uvođenjem inhibitora korozije u agresivnu sredinu
- uklanjanjem aktivatora korozije iz agresivne sredine.

Inhibitori su kemijske tvari koje u malim količinama u agresivnom mediju koče ili prekidaju kemijske reakcije. Aktivatori korozije i sastojci koji povećavaju agresivnost korozivne sredine mogu se ukloniti na više načina:

- neutralizacijom kiselina
- uklanjanjem kisika iz vode
- uklanjanjem soli iz vode
- sniženjem relativne vlažnosti zraka
- uklanjanjem čvrstih čestica.

6. NANOŠENJE ORGANSKIH PREVLAKA

Nanošenje prevlaka na površinu proizvoda najraširenija je metoda zaštite korozije, i to od kemijskih, mehaničkih i bioloških utjecaja. Prevlake se prema karakteru tvari koja čini povezani sloj na površini podloge dijele na (slika 16.) anorganske i organske. Tako da postoje metalne prevlake koje mogu biti samo anorganske, nemetalne anorganske prevlake i organske prevlake koje mogu biti samo nemetalne [3].



Slika 16. Podjela prevlaka prema karakteru tvari [5]

Prevlake veće debljine često se nazivaju i oblogama, a tanke prevlake filmovima.

Premda svaka prevlaka mora štiti podlogu, glavna svrha prevlačenja može biti različita. Prema tom kriteriju razlikuju se:

- *Zaštitne prevlake* su antikorozivne prevlake. To su cink, kadmij, nikal, olovo, kositar, aluminij na ugljičnom čeliku, oksidi na ugljičnom čeliku, oksidi na aluminiju i ugljičnom čeliku, fosfati na ugljičnom čeliku i cinku, kromati na cinku, kadmiju i Mg-legurama, emajl na ugljičnom čeliku, sivom lijevu i aluminiju, boje, lakovi, plastične mase, guma, bitumen i katranske smole na ugljičnom čeliku i sivom lijevu. Prevlake za zaštitu od mehaničkog trošenja, npr. tvrdi krom na ugljičnom čeliku i aluminiju [3].
- *Dekorativne prevlake* daju estetski dojam. Galvanski nikal i dekorativni krom, anodne oksidne prevlake aluminija, emajli, lakovi, boje, plastične mase itd. [3].

- *Funkcionalnim prevlakama* se postiže određena svojstva površine bitna za primjenu proizvoda. Kao što su prevlake za električnu i toplinsku izolaciju. To tu keramika, emajl, plastične mase i guma, prevlake bakra, srebra, zlata, i rodija za osiguranje električne vodljivosti, prevlake kositra, SnPb-legura i kadmija za olakšanje lemljenja, prevlake olova za zaštitu od radijacije, prevlake srebra, nikla i aluminija za refleksiju svjetla, različite crne prevlake za apsorpciju svjetla, antistatičke prevlake na plastičnim masama radi sprečavanja pojave statičkog elektriciteta [3].
- *Reparatrnim prevlakama* se popravljaju proizvodi premalih dimenzija ili se regeneriraju pohabani proizvodi, odnosno oštećeni u eksploataciji. To su prevlake tvrdoga kroma, kemijski izlučenog nikla, monela nanesenog navarivanjem, prevlake dobivene metalizacijom prskanjem, organske prevlake za popunjavanje kao što su kitovi te epoksidne ili poliesterske smole [3].

6.1. Priprema podloge za prevlačenje

Priprema podloge za prevlačenje provodi se u cilju čišćenja i kondicioniranja površine konstrukcijskog materijala, kako bi se postiglo što čvršće prianjanje prevlake. Čišćenjem se s podloge moraju ukloniti sva labava i rahla onečišćenja kao što su masne tvari, većina korozijskih produkata, oštećene prevlake, prašina, čađa, koks i pepeo, dok se *kondicioniranjem* osigurava poželjna kakvoća površine podloge, tj. tražena hrapavost, odnosno glatkoća. Za kvalitetnu predobradu podloge redovito je potrebo nekoliko operacija [3].

6.1.1. Odmašćivanje

Odmašćivanje služi za odstranjivanje mineralnih i bioloških masnih tvari, tj. teških ugljikovodika iz nafte itd. Te tvari potječu od sredstva za hlađenje i podmazivanje pri mehaničkom oblikovanju obradaka odvajanjem čestica ili plastičnim deformacijama, od masnih prevlaka za privremenu zaštitu i od rukovanja golim rukama jer je ljudska koža uvijek masna.

Provodi se radi dobre adhezije između metala i prevlake. Kao sredstva za odmašćivanje koriste se: organska otapala, kisele i lužnate otopine, emulzije, industrijski detergentsi, itd. Poslije odmašćivanja provodi se ispiranje s vodom [3].

Odmašćivanje metala i anorganskih nemetala može se provesti fizikalnim otapanjem u hlapljivim organskim otapalima koja naknadno ishlape s odmašćenih ploha. Najčešće se za odmašćivanje primjenjuju *alifatski* (lančani) *ugljikovodici* (npr. benzin, petrolej) te halogeni alifatski ugljikovodici. Glavni nedostatak ugljikovodika je njihova zapaljivost. *Halogenirani ugljikovodici* nisu zapaljivi tako da se mogu koristiti na povišenim temperaturama. Spomenuta se otapala slabo ili nikako ne miješaju s vodom, što uzrokuje teškoće pri odmašćivanju ploha koje su i vlažne i masne, a što je realnost u praksi. Za odmašćivanje su prikladni i *razrjeđivači* organskih premaza, tj. smjese hlapljivih organskih kapljevina, i to najčešće različitih ugljikovodika, estera, ketona i alkohola. Razrjeđivači su zapaljivi i redovito se ne miješaju s vodom. Odmašćivanje organskim otapalima moguće je provesti trljanjem natopljenom tkaninom (npr. od pamuka), što se u većini slučajeva vrši na velikim objektima [8].

Za grubo odmašćivanje često služi *mlaz vodene pare*, tj. smjese pare s vrelom vodom, koja se proizvodi u tlačnim posudama grijanjem vode iznad 150 °C. Odmašćivanje se može ubrzati dodatkom lužnate tvari ili sredstva za kvašenje.

Potpunost odmašćivanja ispituje se *vodenim testom* pri ispiranju. Voda kvasi odmašćene površine tvoreći neprekinuti film koji se zadržava barem 30 sekundi. Ako se voda povlači s dijela površine nastajanjem suhih otoka, ili ako se skuplja u kapljice, površina je još uvijek masna. [8]

6.1.2. Mehanička priprema podloga

Mehanička priprema podloga za prevlačenje se koristi za skidanje korozijskih produkata i drugih nemasnih oštećenja, te za postizanje određenog stupnja i oblika hrapavosti površine (kondicioniranje). Najčešće se spomenuti ciljevi ostvaruju odvajanjem čestica s obrađivanih ploha trenjem abrazivnih čestica [3].

Vrlo je raširen postupak mehaničke obrade *brušenjem* i *poliranjem* abrazivima, i to u obliku slobodnih (rasutih) zrnaca, odnosno zrna ugrađena u obradna tijela ili alate.

Čišćenje površine i postizanje određene hrapavosti moguće je provesti suhim ili mokrim *mlazom čestica*, odnosno mlazom vode. Čestice u mlazu mogu biti tvrde ili mekše od obratka. O tome, o brzini mlaza, o upadnom kutu mlaza te o obliku i veličini čestica ovisi učinak mlaza. Tvrde čestice s oštrim bridovima uz mali upadni kut (ispod 30°) uglavnom skidaju strugotinu, a uz veći upadni kut i obilje bridova sve više dolazi do izražaja i utiskivanje mikroizbočina, lomljenje krhkih slojeva, te površinsko otvrdnjavanje. Tako djeluje i mlaz mekših čestica koje nemaju abrazivnu moć. Otvrdnjavanje je najjače ako je upadni kut 90° . Za obradu mlazom koristi se [8]:

- kameni pijesak
- zrnca elektrokorunda
- zrnaca silicijeva, borova te volframova karbida
- sačma (obla zrnca) od ugljičnog ili nehrđajućeg čelika, aluminija, bakra ili mjedi
- staklene kuglice (perle).

Obrada mlazom pijeska naziva se pjeskarenje, odnosno mlazom sačme sačmarenje.

Suhi mlaz se dobiva pneumetičkim ili centrifuganim raspršivanjem čestica veličine 0,2 do 3 mm. Za pneumatički postupak služi zrak pod tlakom između 0,3 i 0,7 MPa, za centrifugalni postupak mlaz se stvara na obodu kotača s lopaticama koji se okreće brzinom iznad 50 m/s. Mana suhog mlaza jest obilje prašine koja se stvara tokom pjeskarenja. Ostaci radnih čestica i strugotine odstranjuju se s površine ispuhivanjem zrakom.

Kod obrade *mokrim mlazom* ne razvija se prašina, a mogu se primjenjivati mnogo sitnije čestice (čak do 3 μm veličine). Radni se medij obično priprema u obliku suspenzije od staklenih kuglica ili abraziva i vode u masenom omjeru 1:2 do 1:4. Vodi se često dodaju sredstva za kvašenje i inhibitori korozije. Osim pneumatičkih pištolja koji se napajaju zrakom pod tlakom 0,9 do 0,9 MPa rabe se i centrifugalni i hidraulički raspršivači za obradu mokrim mlazom. Mokra se obrada može provesti i mlazom čiste vode pod vrlo visokim tlakom, do 300 MPa [3].

6.2. Tehnologije nanošenja premaza

Nanošenje premaza na metalne i nemetalne podloge redovito se obavlja višeslojno uz potpuno ili djelomično sušenje prethodnog sloja. Veziva slojeva koji se dodiruju moraju biti istovrsna ili kompatibilna. Nužna je i kompatibilnost između podloge i temeljnog premaza, te između veziva i razrjeđivača/otapala s jedne strane i pigmenata, punila i aditiva s druge strane.

Premazi se nanose *četkama, lopaticama, valjcima, prskanjem, uranjanjem, prelijevanjem i elektroforezom.*

Četke (kistovi) se sastoje od pramenova (snopova) životinjskih, biljnih ili sintetičkih vlakana. Loša je strana četkanja niska produktivnost, pojava tragova (pruga) od kista što uzrokuje lokalnu neravnomjernost debljine premaza i djeluje neestetski. Prednost je brzina i mobilnost kod reparaturnih zahvata.

Lopatice (spatule) se izrađuju od čelika, a služe za nanošenje kitova i nekih pastoznih premaza s velikim udjelom suhe tvari, tako da se dobiju debele prevlake, preko 0,1 mm. Postupak je srodan četkanju.

Ličenje *valjcima* od vune i drugih vlakana mnogo je produktivnije od četkanja, ako se radi o većim plohama. Utrljavanje premaza je slabije nego pri četkanju, ali je sloj glađi i ravnomjerniji.

Prskanje (štrcanje) boja i lakova obavlja se stlačenim zrakom na sobnoj ili povišenoj temperaturi, bezračnim i elektrostatičkim postupkom.

Za *zračno prskanje* služe pištolji u koje se uvodi zrak pod tlakom 0,12 do 0,5 MPa i premazno sredstvo koje se zrakom raspršuje. Ušće pištolja je udaljeno od podloge 150 do 200 mm, a širina mlaza iznosi oko 300 mm. Zbog nastanka magle od sitnih kapljica premaznog sredstva, gubici prskanjem u okolinu kreću se od 20 do 50 %, a osobito su veliki pri prskanju duguljastih proizvoda. Glavna je prednost zračnog prskanja visoka produktivnost te ravnomjerna debljina i estetski dojam prevlake.

Bezračno prskanje ili *airless* postupak može biti pneumatičko ili hidrauličko, ali u oba slučaja mlaz nastaje u pištolju bez miješanja sa zrakom. Tlak se kreće od 1-30 MPa.

Profesionalni bezračni uređaji rade uz tlakove iznad 10 MPa i daju usmjeren mlaz bez pojave magle, a primjena razrjeđivača obično nije potrebna. Produktivnost je zamjetno veća nego pri zračnom prskanju, a dobiju se deblje prevlake, pa se katkad može smanjiti broj slojeva u premaznom sustavu. Snažni mlaz otežava pri bezračnom postupku dobivanje potpuno glatkih prevlaka s visokim estetskim učinkom.

Za elektrostatičko prskanje premaza nužan je visok napon, 30-150 kV, između pištolja i obradaka koji su obješeni na uzemljeni prijenosnik (obično lančani konvejer). Potrebne struje su vrlo male (100-200 μ A).

Uranjanjem se premazi nanose na manje, jednostavne obratke koji se proizvode u velikim serijama. Gubici su mali, ali je teško postići prevlake jednolične debljine na kompliciranim profilima te na unutarnjim i vanjskim površinama cijevi.

Prelijevanjem se obično liče veći predmeti po čijoj se površini premazna sredstva lako razlijevaju, a nisu prikladni za prskanje zbog velikih gubitaka (rešetkasti i rebrasti proizvodi).

Elektroforeza najčešće služi za nanošenje premaza na metal u vodenim disperzijama ili otopinama premaza, u kojima postoje pozitivno i negativno nabijene čestice polimernog veziva s pigmentom ili bez njega, pri čemu je voda suprotno nabijena. U istosmjernom električnom polju čestice premaza putuju prema suprotno nabijenom obratku, a voda u obratnom smjeru, pa se dobiva skoro suh premaz. Za razrjeđivanje koristi se čista (deionizirana) voda, a maseni udio čvrste tvari u mediju iznosi 5-20 %. Elektroforetički se nanose samo temeljni premazi debljine 20-35 μ m (npr. karoserije) [3].

6.3. Organski premazi, podjela i sastav

Organskim se prevlakama smatraju sve one koje čini kompaktnima organska tvar tvorbom opne. Takvi se slojevi dobiju nanošenjem organskih premaznih sredstava (bojanjem i lakiranjem), uobičajenim podmazivanjem, plastifikacijom (prevlačenjem plastičnih masa) gumiranjem ili bitumenizacijom.

Naziv *premazi* se koristi za gotove prevlake nastale njihovim sušenjem. Sva premazna sredstva sadrže:

- *vezivo* koje čini opno prevlake
- *otapalo* i *razrjeđivač* koji obično otapa vezivo

a mogu sadržavati još [3]:

- *pigmente* i *punila* koji daju nijansu i čine premaze neprozirnim
- *aditive*.

Lakovi mogu biti prozirni ili nebojeni, a ako su pigmentirani, razlikuju se od boja većom gustoćom, sjajem i tvrdoćom prevlake. Boje i lakovi se najčešće nanose višeslojno, a svrha im je većinom zaštitno dekorativna.

Organska se premazna sredstva razvrstavaju na nekoliko načina, među koja nijedan ne definira dotično sredstvo u potpunosti. Glavni načini razvrstavanja premaznih sredstava su prema:

- *sastavu*, pri čemu se podjela obično osniva na vrsti veziva, ali katkad i na vrsti pigmenta, odnosno razrjeđivača/otapala
- *osnovnoj namjeni* (sredstva za zaštitu od korozije, od mehaničkog oštećivanja, od požara, od biološkog obraštanju, sredstva za dekoraciju, za električnu izolaciju, itd.)
- *izgledu* (bezbojne i različito obojene, mutne i sjajne, prozirne i neprozirne boje i lakovi, lakovi za postizanje dojma sjajnog ili kovanog metala, mreškanja i ledenog cvijeća itd.)
- *podlogama na koje se nanose* (crni i obojeni metali, građevinski materijali, drvo itd.)
- *broju sastojaka koji se miješaju prije nanošenja* (jednokomponentna, dvokomponentna i višekomponentna premazna sredstva)
- *ulozi u premaznom sustavu* (temeljna, međuslojna i pokrivna premazna sredstva, kitovi, itd.)
- *načinu skrućivanja sloja* (fizikalno isparavanje razrjeđivača/otapala, odnosno kemijsko otvrdnjavanje reakcijama u vezivu ili s vezivom).

Kao *veziva* za boje i lakove služe mnoge neisparljive organske tvari u obliku viskoznih kapljevina ili smola. U određenom premaznom sredstvu često se kombiniraju različita veziva, kako bi se postigla željena svojstva premaza. Valja istaknuti da se vezivo premaznog sredstva bitno razlikuje od tvari koja čini opnu prevlake ako ona nastaje kemijskim otvrdnjivanjem. Važna su veziva na osnovi sušivih masnih ulja, poliplasta, derivata celuloze, prirodnih smola, prirodnog ili sintetičkog kaučuka i bitumoznih tvari.

Kao *razrjeđivači* i *otapala* za boje i lakove najčešće služe smjese organskih kapljevina, prilagođene vezivu premaza. Redovito se radi o niskoviskoznom i lako hlapljivim smjesama na osnovi alifatskih, aromatskih i kloriranih ugljikovodika, alkohola, ketona, estera itd. Iste organske kapljene često služe i kao razrjeđivači za sniženje viskoznosti premaznih sredstava i kao otapala za njihova veziva, a neki služe samo za sniženje viskoznosti, ne i otapanja veziva.

Kao *pigmenti* i *punila* za boje i lakove služe anorganski oksidi, hidroksidi i soli, metalni elementi, ugljik i neki organski spojevi u obliku netopljivosti čestica. *Pigmentima* se postiže neprozirnost i obojenje premaza, a redovito se poboljšava i njihovo zaštitno djelovanje, otpornost na svjetlo i grijanje te mehanička svojstva. Pigmenti mogu biti dekorativni, antikorozijski i dekorativno-antikorozijski. *Punila* su, zapravo, jeftini bijeli pigmenti sa slabom moći pokrivanja, što znači da tek uz velike udjele daju neprozirnost premaza.

Aditivi se dodaju premaznim sredstvima u malim udjelima, ispod 5 % masenog udjela, a najvažniji među njima su katalizatori oksidirajuće polimerizacije, odnosno umrežavanja, omekšivači (plastifikatori) veziva i organski inhibitori korozije. Otvrdivače ne bi trebalo ubrajati u aditive jer se oni pri umrežavanju ugrađuju u vezivo premaza [3].

7. ODABIR SUSTAVA PREMAZA

7.1. Uvod

Transformatori su zaštićeni sustavima premaza koji primarno daju prihvatljivu zaštitu od korozije i koji su bez utjecaja na električka svojstva transformatora. Danas osim estetskog tu su i zahtjevi za očuvanje okoliša, dugi vijek trajanja, sigurnost proizvoda, itd. Sigurnost proizvoda odnosi se na premaze koji imaju kontakt s uljem, da ga ne kontaminiraju i time ne smanje energetske efikasnost i vijek trajanja jezgre [9].

Zbog mnogo rastavljivih spojeva, vijcima na poklopcima, potrebno je odabrati premazni sustav s dovoljno prionjivosti i elastičnosti da ne dođe pucanja ili odvajanja premaza nakon zatezanja vijka (slika 17.) [9].



Slika 17. Pucanje premaza nakon zatezanja vijka [9]

7.2. Sustav premaza

U višeslojnom sustavu (slika 18.) premazi se prema namjeni dijele na [2]:

- *temeljne premaze* – osiguravaju adheziju na podlogu i sprječavaju koroziju
- *međupremaze* – daju neprozirnost, povećavaju debljinu filma i poboljšavaju zaštitni učinak sustava
- *završne premaze* – zadovoljavaju zahtjeve u vezi s nijansom boje, sjajem, lakoćom čišćenja, otporom na abraziju te štite prethodne premaze od utjecaja okoline (vode, onečišćene atmosfere, itd.).



Slika 18. Peteroslojni sustav premaza, ukupne debljine najčešće od 360 do 600 μm [2]

7.2.1. Temeljni premaz

Temeljni premazi nanose se izravno na metale (ali i druge supstrate), pri čemu moraju osigurati dobru prionjivost na podlogu i zaštitu od korozije. Zaštita se ostvaruje pasivno kao film koji odvaja konstrukcijski metal od korozivne okoline i aktivno kočeći ionizaciju metala podloge, i to inhibicijom, neutralizacijom agresivnih sastojaka medija ili katodnom zaštitom.

Aktivna zaštita metala od korozije temeljnim premazima osniva se na djelovanju pigmenata koji po pravilu čine više od 80 % masenog udjela takva premaza. Da bi se osigurala djelotvornost antikorozivnih pigmenata, poželjno je da oni budu što bliže ili čak u neposrednu kontaktu s metalnom podlogom, pa se temeljni premazi na metale često nanose postupcima koji omogućuju utrljavanje premaza u udubine površine podloge (npr. kistovima). Temeljni premazi moraju biti kompatibilni s velikim brojem pokrivnih premaza te omogućiti dugi vremenski interval premazivanja. Do nanošenja pokrivnog premaza može proći i nekoliko mjeseci pa moraju biti otporni na atmosferilije [2, 16].

Značajke temeljnog premaza jesu [2]:

- *prionjivost* – jaka veza s podlogom
- *kohezija* – velika čvrstoća sloja
- *inertnost* – jaka otpornost na koroziju i kemikalije
- *vezivanje s međupremazom* – jaka veza s međupremazom
- *elastičnost* – da prati dilataciju podloge.

7.2.2. *Međupremaz*

Međupremaz se može sastojati od jednog ili više slojeva, a čini vezu između temeljnoga i završnog premaza. Mora dobro prijanjati na temeljni premaz, a jednako tako činiti dobru osnovu za prijanjanje završnog premaza. Zaštitno svojstvo ostvaruje se uglavnom preko listićavih pigmenata koji se slažu paralelno s površinom i otežavaju prodor vlage i kisika do podloge [2].

Međupremazi služe i kao povezni slojevi (engl. tie coat) između antikorozijskih premaza i premaza posebne namjene, kao što su protuobraštajne boje [2].

Značajke temeljnog premaza jesu [2]:

- jaka kemijska otpornost
- nepropusnost na vlagu
- povećani električni otpor
- jaka kohezija
- jaka veza između temeljnoga i završnog sloja.

7.2.3. *Završni premaz*

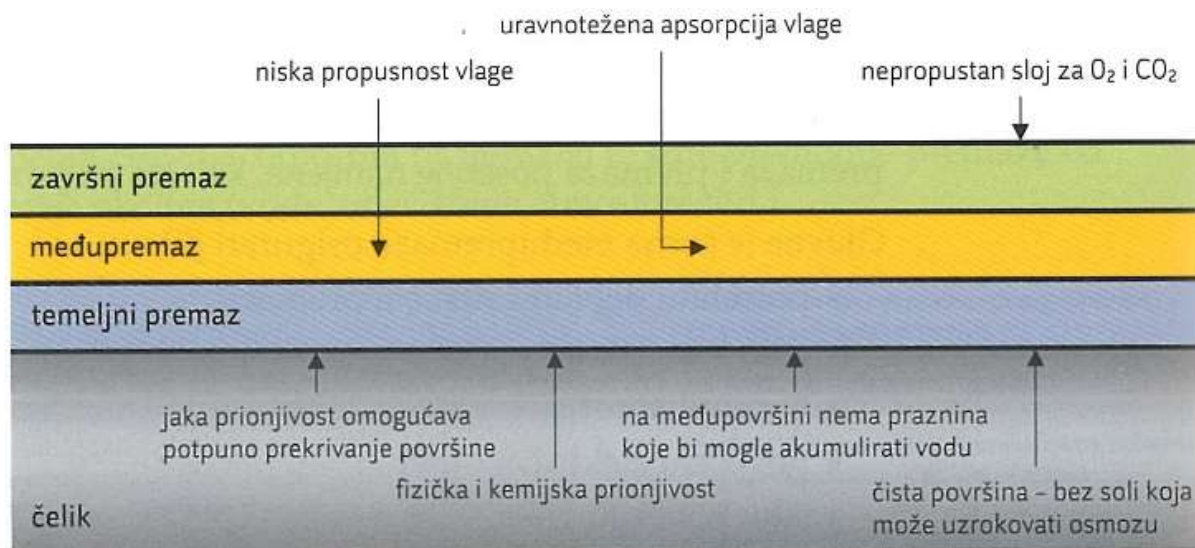
Završni premaz nanosi se povrh prije nanesenih slojeva i daje tražene karakteristike površine kao što su nijansa boje, stupanj sjaja, izgled i otpornost na vanjske utjecaje. Manje je debljine od međupremaza, ali zbog visokog udjela veziva ima veću gustoću i tvori čvrsti sloj. Osim zaštitne funkcije, završni premazi mogu imati i specijalnu namjenu kao što je sprječavanje obraštanja podvodnih dijelova konstrukcija, širenja požara ili pak onemogućivanje sklizanja [2].

Glavne funkcije završnog premaza jesu [2]:

- jaka kemijska otpornost
- nepropusnost na vlagu
- povećani električni otpor
- jaka kohezija
- estetski izgled
- otpornost na atmosferilije.

7.3. Mehanizam zaštitnog djelovanja premaza učinkom barijere

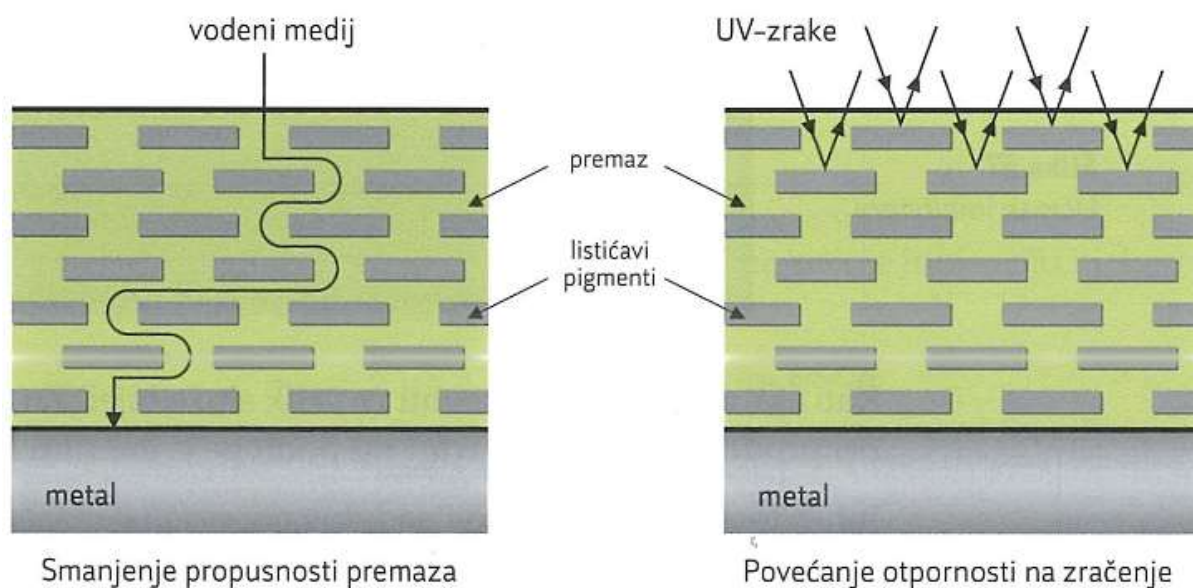
Učinak barijere postiže se primjenom debelih premaza (od 250 do 500 μm) s vrlo niskom propusnošću na vodu. Stvara se barijera koja zadržava nabijene ione i usporava prodor vode i kisika prema površini (slika 19.). Zbog svojih svojstava nepropusnosti, učinak barijere je prvi i često jedini izbor zaštite premazima za čelik koji je neprekidno uronjen [2].



Slika 19. Učinak barijere [2]

Dodavanjem pigmenata u listićima, učinak se barijere može postići i pri manjim debljinama zaštitnoga filma. Listićavi se pigmenti pri nanošenju premaza orijentiraju usporedno s površinom podloge odnosno prethodnog sloja, čime se višestruko povećava put difuzije reaktanata i produkata korozije kroz premaz; pri tome se pretpostavlja inertnost i potpuna nepropusnost pigmenata. Najvažniji listićavi pigmenti su listići Al, željezni tinjac, listićavi Fe_2O_3 (MIOX) te grafitni listići. Takvi pigmenti mogu bitno smanjiti propusnost premaza [2].

Dodatno, listićavi pigmenti reflektiraju elektromagnetsko i drugo zračenje u površinskom dijelu premaza, čime koče degradaciju veziva i povećavaju trajnost zaštite. U tom smislu osobito povoljno djeluju listići Al, a u novije vrijeme i listići Zn, i to osobito što se tiče sprječavanja degradacije pod utjecajem ultraljubičastih zraka. Na slici 20. prikazano je navedeno djelovanje listićavih pigmenata u premazu [2].



slika 20. Učinak nepropusnih listićavih pigmenata u premazu [2]

7.4. Odabir sustava premaza

Odabir sustava premaza je najvažniji i stručno najzahtjevniji dio posla u procesu bojenja. Pri odabiru je potrebno uzeti u obzir radno okruženje konstrukcije koja se zaštićuje, funkciju, predviđeni rok trajanja zaštitnoga premaza i mogućnost održavanja svakoga sustava. Odabrani sustav premaza mora biti podoban i za primjenu. Potrebno je razmotriti zahtjeve u vezi sa sigurnošću, zdravljem i zaštitom okoliša te klimatske uvjete prilikom rada. Od ostalih čimbenika svakako treba uzeti u obzir i stupanj nadziranja kvalitete izvođenja zaštite premazima [2].

Cijena sustava premaza treba se razmotriti s obzirom na očekivani rok trajnosti, stupanj kvalitete pripreme površine, izdašnost (m^2/l), brzinu zaštićivanja (vrijeme sušenja tj. međupremazne intervale) te opseg i učestalost održavanja. Nakon što se utvrdi da izabrani sustav premaza zadovoljava sve navedene zahtjeve i nakon što su uzete u obzir sve okolnosti njegova nanošenja, izrađuje se radni plan. Planiranom organizacijom proces nanošenja premaza valja učiniti kontinuiranim, a time vremenski što kraćim.

Prilikom odabira premaznoga sustava potrebno je razmotriti pitanja kao što su [2]:

- eksploatacijski uvjeti kojima će premaz biti izložen
- vrijeme trajanja zaštite
- način pripreme površine
- okolišni uvjeti prilikom nanošenja premaza
- može li se odabrati premaz manje opasan za okoliš i čovjeka
- cijena premaza po kvadratnom metru površine koja se zaštićuje.

7.4.1. Korozivnost okoliša

Koji sustav zaštite primijeniti ovisi prvenstveno o korozivnosti okoliša u kojemu će određena konstrukcija raditi. Čest je slučaj da je jedna te ista konstrukcija izložena različitim okolišnim opterećenjima što dodatno otežava odabir [2].

Pomoć u odabiru premaznog sustava može se naći u normi HRN EN ISO 12944 Boje i lakovi – Zaštita od korozije čeličnih konstrukcija zaštitnim sustavom boja, koja povezuje klasifikaciju medija s odgovarajućim premaznim sustavom. Normom su obuhvaćena i pravila za oblikovanje konstrukcije, pripremu površine, nadzor, specifikacije te laboratorijska ispitivanja. Namjena norme je postaviti opća pravila za planiranje, izbor antikorozivne zaštite i njezino izvođenje [2, 12].

7.4.2. Zaštita premazima konstrukcija izloženih atmosferskim uvjetima

Atmosferska korozija je najrašireniji oblik korozije, a rezultat je djelovanja dvaju čimbenika – kisika i vlage. U nedostatku jednog od njih ne dolazi do korozije. U suhom zraku temperature niže od ledišta vode ili pri relativnoj vlažnosti manjoj od 60 % čelik ne korodira. Stoga je korozija zanemariva u polarnim predjelima i u vrućim pustinjskim krajevima [3].

Norma HRN EN ISO 12944-2:1999 definira korozivnost okoline preko gubitka mase po jedinici površine (g/m^2), odnosno debljine nezaštićena niskolegirajućeg čelika ili cinka. Okoliš u kojemu je gubitak mase najmanji kategoriziran je kao C1, dok je s C5-M kategoriziran okoliš u kojemu je gubitak materijala najveći (slika 21.). [2, 9, 10].

Kategorija korozivnosti	Gubitak mase po jedinici površine/gubitak debljine (poslije prve godine izlaganja)				Primjeri tipičnog okruženja u umjerenoj klimi	
	Niskouglični čelik		Cink		Vanjsko	Unutarnje
	Gubitak mase g/m ²	Gubitak debljine μm	Gubitak mase g/m ²	Gubitak debljine μm		
C1 jako mala	≤10	≤1,3	≤0,7	≤0,1	–	grijane građevine s neutralnom atmosferom; uredi, trgovine, škole, hoteli
C2 mala	>10-200	>1,3-25	>0,7-5	>0,1-0,7	okruženja s malim zagađenjem; najčešće sela	negrijane građevine; garaže, sportske dvorane
C3 srednja	>200-400	>25-50	>5-15	>0,7-2,1	gradska i industrijska okruženja, srednje zagađenje sumporovim dioksidom; obalna područja s malim salinitetom	proizvodne prostorije s velikom količinom vlage i malim zagađenjem zraka; pogoni za proizvodnju hrane, pivovare, mljekare, praonice rublja
C4 visoka	>400-650	>50-80	>15-30	>2,1-4,2	industrijska i obalna područja sa srednjim salinitetom	kemijski pogoni, bazeni, pristaništa brodova i čamaca
C5-I jako visoka (industrija)	>650-1500	>80-200	>30-60	>4,2-8,4	industrijska područja s visokom količinom vlage i agresivnom atmosferom	objekti ili okruženja s konstantnom kondenzacijom i velikim zagađenjem
C5-M jako visoka (more)	>650-1500	>80-200	>30-60	>4,2-8,4	obalna i morska područja s visokim salinitetom	objekti ili okruženja s konstantnom kondenzacijom i velikim zagađenjem

Slika 21. Kategorija korozivnosti i primjer okruženja [2]

Norma 12944-5 definira životni, tj. eksploatacijski vijek sustava premaza kao [12]:

- kratkotrajni (L, engl. low): 2-5 godina
- srednjetrojajni (M, engl. medium): 5-15 godina
- dugotrajni (H, engl. high): > 15 godina.

Nakon što je klasificiran okoliš u kojemu će konstrukcija djelovati i definirana potrebna trajnost zaštite, pristupa se odabiru odgovarajućega sustava premaza. Premazi za atmosfersku zaštitu moraju biti otporni na koroziju, padaline, močenje i sušenje, promjene temperatura, djelovanje UV-zraka, moraju se lako održavati, a također moraju biti i dekorativni. Norma HRN EN ISO 12944-5:2008 daje primjere premaznih sustava koji su se pokazali odgovarajućima za konstrukcije izložene različitim korozijskim sredinama prema HRN EN ISO 12944-2:1999, na temelju dosadašnjega saznanja i primjene (slika 22.) [2, 10].

Temeljni premazi				Pokrivni premazi	Sustav premaza		Očekivana trajnost sustava														
Vezivo	Pigment	Broj slojeva	DSF, μm	Vezivo	Broj slojeva	DSF, μm	C2			C3			C4			C5-I			C5-M		
							L	M	H	L	M	H	L	M	H	L	M	H	L	M	H
AK, AY	Misc.	1-2	100	–	1-2	100	<div></div>														
AK	Misc.	1-2	80	AK	2-4	160	<div></div>														
EP	Misc.	1	160	AY	2	200	<div></div>														
EP, PUR, ESI	Zn (R)	1	60	AY, CR, PVC	2-3	160	<div></div>														
AK, AY, CR, PVC	Misc.	1-2	80	AY, CR, PVC	3-5	200	<div></div>														
EP, PUR	Misc.	1-2	120	AY, CR, PVC	3-4	200	<div></div>														
EP, PUR, ESI	Zn (R)	1	60	AY, CR, PVC	2-4	200	<div></div>														
EP, PUR, ESI	Zn (R)	1	60	AY, CR, PVC	4-5	320	<div></div>														
EP	Misc.	1-2	80	EP, PUR	2-3	120	<div></div>														
EP	Misc.	1-2	80	EP, PUR	3-5	200	<div></div>														
EP, PUR, ESI	Zn (R)	1	60	EP, PUR	3-4	200	<div></div>														
EP, PUR, ESI	Zn (R)	1	60	EP, PUR	3-4	240	<div></div>														
EP	Misc.	1-2	80	EP, PUR	3-5	280	<div></div>														
EP, PUR, ESI	Zn (R)	1	60	EP, PUR	3-4	320	<div></div>														
EP, PUR	Misc.	1-2	80	EP, PUR	3-4	320	<div></div>														

AK – alkid, AY – akril, EP – epoksi, PUR – poliuretan, ESI – etil silikat, CR – klorkaučuk, PVC – polivinilklorid, Misc. – ostali pigmenti, Zn (R) – pigment cinkov prah, DSF – debljina suhog filma, μm ,

Slika 22. Sustavi premaza za niskouglični čelik za korozivnost okoliša C2-C5 [2]

8. TEHNOLOGIJA ZAŠTITE KUĆIŠTA ENERGETSKIH TRANSFORMATORA

8.1. Odabir sustava premaza za zaštitu energetskih transformatora

Danas gotovo svi veći proizvođači energetskih transformatora uglavnom se bave projektiranjem i ugradnjom dijelova, dok proizvodnju dijelova poput kućišta transformatora podugovaraju s vanjskim proizvođačem koji se specijalizirao u proizvodnji metalnih konstrukcija. U projektnoj dokumentaciji projektiraju i antikorozivnu zaštitu tako što odaberu sustav zaštite prema normi HRN EN ISO 12944-5:2008.

U ovom slučaju proizvođač Končar D&ST d.d. dao je zahtjev za kategoriju korozivnosti okoline C3 i srednjetrojajni eksploatacijski vijek M sustav premaza S3.17 iz tablice A.3 prema normi HRN EN ISO 12944-5:2008. U tablici 1. dane su značajke odabranog sustava premaza. Radi se o sustavu premazu na bazi epoksidnih i poliuretanskih veziva.

Tablica 1. Značajke srednjetrojajnog eksploatacijskog vijeka sustava premaza S3.17 [12]

Značajka	Vrijednost značajke
Sustav premaza	S3.17
Kategorija korozivnosti	C3
Vijek sustava premaza	M, srednjetrojajni, 5 - 15 godina
Stupanj priprema površine	Sa 2½
Temeljni premaz	Epoksidni, 1 sloj, 60 µm
Međupremaz	Epoksidni, 1 sloj, 60 µm
Završni premaz	Poliuretan, 1 sloj, 40 µm
Minimalna ukupna debljina suhog filma	160 µm

Za proizvođača premaza odabrano je društvo CHEMISCHE INDUSTRIE ERLANGEN GmbH, a popis odabranih premaza su dani u tablici 2.

Tablica 2. Popis odabranih premaza

Naziv proizvoda	Premaz	Vezivo
CHING-EP-Primer EMC 182 white K-DB	Temeljni premaz	Epoksid
CHING-EP-Intermediate EMD 30 grey TR	Među premaz	Epoksid
CHING-PUR-Topcoat ADD 43	Završni premaz	Poliuretan

CHING jest grupni naziv proizvoda gore spomenutog proizvođača premaza za transformatore i radijatore. Zahtjevi za navedene premaze su prihvatljiva korozijska zaštita bez utjecaja na energetska svojstva transformatora.

8.1.1. Epoksidni premaz (EP)

Epoksidni premazi formiraju čvrste i tvrde premaze koji su otporni na većinu okoline. Upotrebljavaju se u offshore industriji, agresivnim i kemijskim zagađenim okolinama. Također se koriste u slabije zagađenim okolinama za dugi vijek trajanja konstrukcije. Postojani su u atmosferi i vodi, kiselim i lužnatim vodenim otopinama, u tlu i u organskim otapalima. Na suncu su epoksidni slojevi skloniji kredanju zbog djelovanja ultraljubičastih zraka koje rastvaraju vezivo. Ta pojava kvari izgled površine. Podnose temperature do 120 °C. Zbog navedenih karakteristika često se koriste kao temeljni i međupremaz. [10].

Dvokomponenti EP premazi otvrdnjuju kemijskom reakcijom, a sastoje se od osnove i otvrdnjivača (tzv. baza i kontakt) [2, 10].

8.1.2. Poliuretanski premaz (PUR)

Poliuretanski premazi su jako otporni prema otopinama, imaju visoku kemijsku postojanost i nisku propusnost na vodenu paru [10].

Karakteristike poliuretanskog premaza su lijepi izgled, postojane nijanse, sjaj i zaštita od sunca, otporne na abraziju i na temperature do 170 °C. Zbog navedenih karakteristika česti se koriste kao završni premaz. Premazna sredstva na osnovi poliuretana mogu biti jednokomponentna ili dvokomponentna. Jednokomponentna sredstva otvrdnjuju djelovanjem vlage iz zraka, pečenjem na temperaturi višoj od 85 °C ili su veziva modificirana suvišnim uljima i alkidima, odnosno katranskom smolom. Najkvalitetnije prevlake daju dvokomponentna sredstva od izocijanatnog i poliesterskog (ili polieterskog) dijela koja reaktivno otvrdnjuju u premaze s lijepim izgledom, postojane nijanse [2, 14].

8.2. Priprema površine

Priprema površine je najvažnije za uspješno prianjanje premaza na metalnu podlogu. Nečistoće mogu fizički i kemijski smanjiti prionjivost nanošenog premaza [11].

Priprema površine transformatora provedena je pneumatičkim suhim postupkom mlazom oštrobriđne (lomljene) sačme koja se koristi za bolju prionjivost boje tj. sidrenje premaza [2].

Stupanj pripreme površine nakon obrade mora biti Sa 2½ prema zahtjevu sustava premaza S3.17. Definirano je u normi HRN EN ISO 8501-1:2007 za navedeni stupanj da je površina vrlo temeljito očišćena mlazom abraziva. Kad se promatra bez uvećanja, na površini se ne smije vidjeti ulje, masnoća i nečistoće te na njoj ne smiju biti prisutne okujine, hrđe, premaza ili stranih tijela. Bilo koji ostali tragovi onečišćenja smiju se pojaviti samo u obliku laganih mrlja kao pjege ili pruge [17].

Stanje površine transformatora kućišta prije sačmarenja (slika 23.) i nakon sačmarenja (slika 24.).

Nakon suhog postupka pripreme površine mlazom sačme potrebno je stlačenim zrakom ispuhati ostatke sačme i prašine na površini [10].



**Slika 23. Stanje površine kućišta nakon ispitivanja na nepropusnost sapunicom,
Komet d.o.o. [1]**



Slika 24. Stanje površine kućišta nakon sačmarena, Komet d.o.o. [1]

8.3. Priprema premaza

Miješanje boje nije jednostavan posao i pri nekorektnom miješanju može doći do neuspješne kemijske reakcije nakon nanošenja dvokomponentnih premaza, ili možemo dobiti nehomogenu mješavinu i pigmenti mogu ostati u donjem dijelu posude. Na slici 25. prikazan je alat za dobivanje homogene mješavine strojnim miješanjem [2, 10].



Slika 25. Alat za strojno miješanje boje [1]

8.4. Nanošenje premaza

Epoksidni premazi imaju donju temperaturnu granicu nanošenja od 10 °C, dok je za niže temperature potrebno koristiti nisko temperaturne otvrdnjivače. Poliuretanski premazi se mogu nanositi na temperaturama iznad -10 °C [10].

Nanošenje temeljnog premaza prvo se vrši valjcima kojima se pokrivaju teško dostupna mjesta (slika 26.), kako bi se osigurala dovoljna debljina premaza nakon postupka bezračnog nanošenja premaza (slika 27.). Ulazni tlak koji se koristi na stroju za bezračno prskanje iznosi 4,0 do 4,5 bara.



Slika 26. Nanošenje premaza valjcima na teško dostupnim mjestima [1]



Slika 27. Nanošenje premaza bezračnim postupkom [1]

Na slici 28. prikazano je nanošenje epoksidnog međupremaza na temeljni premaz, opet se prvo valjcima nanosi premaz na teško dostupna mjesta. Na slici 29. prikazan je izgled poliuretanskog završnog premaza.



Slika 28. Epoksidni temeljni premaz i međupremaz [1]



Slika 29. Izgled završnog poliuretanskog premaza, Komet d.o.o. [1]

Sušenje se odvija u komorama na minimalnoj temperaturi površine kućišta od 85 °C i vremenskom periodu od 2 sata.

9. KOROZIJA TRANSFORMATORA U EKSPLOATACIJI

Premazni sustavi koji se koriste kod transformatora doista su zahvalni, održavanje tako bitnih dijelova elektroprivrede je zaista na visokom nivou. Zbog niskih zahtjeva za kvalitetu pojavljuju se neki oblici korozije zbog loše izvedenih zavarivačkih radova (slika 30.) ili lošeg konstrukcijskog rješenja (slika 31.). Najčešće takve nesukladnosti ne utječu na konačnu funkcionalnost proizvoda, daleko su od očiju javnosti i kao takvi prihvaćeni od strane kupca zbog rokova isporuke.



Slika 30. Loše izvedeni zavarivački radovi [9]



Slika 31. Loše konstrukcijsko rješenje [9]

Na slici 32. prikazana je pojava korozije u procjepu između temelja i dna transformatora koje se popravi tokom održavanja transformatora.



Slika 32. Korozija u procjepu između temelja i dna transformatora [9]

Na slici 33. prikazano je još jedno loše konstrukcijsko rješenje, oštar brid, te se u tom području postiže manja debljina premaza. Zbog toga je potrebno napraviti zaobljenje oštarih bridova.



Slika 33. Atmosferska korozija na oštrom bridu [9]

I već spomenuta korozija na slici 34. koja nastaje nakon pucanja premaza zbog nedovoljne elastičnosti i prionjivosti premaza.



Slika 34. Atmosferska korozija uslijed pucanja premaza [9]

10. EKSPERIMENTALNI RAD

Eksperimentalni dio diplomskog rada sastoji se od ocjenjivanja kvalitete zaštite premazima ubrzanim korozijskim ispitivanjima u vlažnoj i slanoj komori. Određena je hrapavost sačmarene površine, izmjerena je debljina i ispitana su fizikalna svojstva premaza (sjaj, tvrdoća, prionjivost – "Cross-cut" test, vlačna čvrstoća – "Pull-off" test, otpornost na udar).

Laboratorijska ispitivanja provedena su u Laboratoriju za zaštitu materijala FSB-a, a priprema površine, nanošenje premaza i sušenje provedeno je u tvrtki Komet d.o.o. iz Preloga.

Cilj ispitivanja bio je ispitati fizikalna svojstva i korozijsku otpornost troslojnog sustava premaza na bazi epoksidnih i poliuretanskih veziva, minimalne debljine 160 μm , za vijek trajanja 5 do 15 godina. U eksperimentu se koristio dvadeset i jedan uzorak.

U tablici 3. dan je popis ispitnog premaznog sustava u eksperimentalnom dijelu.

Tablica 3. Popis odabranog premaznog sustava korištenog u eksperimentalnom dijelu

Premaz	Vezivo	Pigment	DSF [μm]
Temeljni premaz	Epoksid	Cink fosfat	60
Među premaz	Epoksid	MIOX	60
Završni premaz	Poliuretan	MIOX	40

10.1. Značenje ispitivanja zaštitnih premaza

Svrha je zaštitnih premaza da dovoljno dugo štite konstrukcijski materijal od štetnih utjecaja okoline. Najvažnije tehničko svojstvo premaza je njihova trajnost, odnosno vijek trajanja. Tehnički prijem premazanih proizvoda ili poluproizvoda obavlja se na temelju kontrole kvalitete premaza, a ta se redovito osniva na zapažanjima prilikom vizualnog pregleda, rezultatima mjerenja debljine suhog premaza, te rjeđe ispitivanjima prionjivosti na priloženom uzorku koji se mora zatražiti u zahtjevu. Zatim se ocjenjuje kvaliteta prevlake u skladu s normama, internim normama ili ugovornim obavezama prema naručitelju. Ako ispitivanja zadovoljavaju propise, proizvod ili poluproizvod se prima i upućuje na montažu ili eksploataciju [12].

10.2. Plan ispitivanja

Dvadeset uzorka je izrezano iz lima debljine 4 mm, kvalitete čelika S235JR, dimenzija 100 x 150 mm. Jedan uzorak je izrezan iz lima debljine 1 mm, zbog ispitivanja otpornosti premaza na udar.

U tablici 4. dan je prikaz plana ispitivanja uzoraka koji su prikazani na slici 35.

Tablica 4. Plan ispitivanja uzoraka

Ispitivanja	Uzorci
Hrapavost sačmarene površine	18
Debljina premaza	Svi uzorci
Sjaj premaza	19
Tvrdoća premaza	19
Otpornost premaza na udar	23
Slana komora	2, 8, 13
Vlažna komora	14, 16, 17
Prionjivost premaza – "Cross-cut" test	12, nakon komore: 2, 8, 13, 14, 16, 17
Vlačna čvrstoća premaza – "Pull-off" test	10, nakon komore: 2, 8, 13, 14, 16, 17



Slika 35. Prikaz ispitnih uzoraka [10]

10.3. Određivanje hrapavosti sačmarene površine

Hrapavost površine bitna je za sidrenje premaza na površinu proizvoda, čime dobivamo bolju prionjivost. U ovom slučaju hrapavost površine osigurali smo sačmarenjem gdje smo dobili stupanj pripreme površine Sa 2½, prema normi ISO 8501-1 i hrapavost iznad 50 µm. Ispitivanje hrapavosti odredili smo na uzorku 18 pomoću uređaja Elcometer 224 prikazanog na slici 36. Vrijednosti ispitivanja prikazane su u tablici 5.



Slika 36. Uzorak 18 i uređaj Elcometer 224 za mjerenje hrapavosti površine [10]

Tablica 5. Izmjerene vrijednosti hrapavosti sačmarene površine na uzorku 18

Hrapavost sačmarene površine [µm]			
Mjerenje	Vrijednost	Mjerenje	Vrijednost
1.	95	6.	57
2.	53	7.	89
3.	51	8.	99
4.	74	9.	53
5.	53	10.	66
Srednja vrijednost hrapavosti (Ry5):			69

Srednja vrijednost iznosi 69 µm što odgovara zahtjevima proizvođača premaza, koji traži da srednja vrijednost hrapavosti (Ry5) bude između 50 – 85 µm.

10.4. Mjerenje debljine suhog filma premaza

Prema normi HRN EN ISO 2808:2008 provedeno je mjerenje debljine suhog filma premaza na svim uzorcima prije korozijskih ispitivanja. Provedeno je po deset mjerenja za svaki uzorak uređajem Elcometer 456 (slika 37.). Uređaj je prije mjerenja umjeren korištenjem priloženog etalona na glatkoj podlozi. Izmjerene rezultate uređaj pohranjuje u blokove. Nakon izvršenog mjerenja uređaj se spaja na računalo i dobivaju se statistički podaci o debljini premaza. Vrijednosti debljina premaza prikazane su u tablici 6.



Slika 37. Uređaj Elcometer 456 za mjerenje debljine prevlake [10]

Tablica 6. Izmjerene vrijednosti debljine premaza na svim uzorcima

Debljina premaza [μm]							
Uzorak	Maks.	Min.	Prosjek	Uzorak	Maks.	Min.	Prosjek
1	195,0	176,0	182,8	12	203,0	183,0	190,8
2	201,0	169,0	188,7	13	203,0	180,0	189,9
3	194,0	162,0	176,8	14	203,0	178,0	188,5
4	182,0	162,0	172,3	15	182,0	155,0	172,2
5	206,0	182,0	192,2	16	219,0	169,0	189,5
6	195,0	177,0	187,0	17	209,0	181,0	189,4
7	197,0	163,0	183,4	18	198,0	168,0	182,8
8	200,0	181,0	189,9	19	193,0	171,0	181,3
9	207,0	163,0	184,1	20	187,0	151,0	174,0
10	206,0	163,0	185,1	23	327,0	305,0	311,9
11	194,0	176,0	182,9	-	-	-	-

10.5. Ispitivanje sjaja premaza

Sjaj premaza izmjeren je uređajem Glossmeter TQC GL0030 20°/60°/80°, tzv. reflektometrom prikazanim na slici 38. Uređaj omogućava mjerenje pod kutovima od 20°/60°/80°. Mjerenje se provodi prema normama ISO 2813 i ASTM D523. Umjeravanje uređaja vršeno je na crnom tijelu koje dolazi sa kućištem uređaja. Ispitivanje je vršeno na uzorku 19, vrijednosti ispitivanja prikazane su u tablici 7.



Slika 38. Uređaj Glossmeter TQC GL0030 20°/60°/80° za mjerenje sjaja prevlake [10]

Tablica 7. Izmjerene vrijednosti sjaja premaza na uzorku 19

Sjaj [GU]			
Kut upada [°]	1. mjerenje	2. mjerenje	3. mjerenje
20°	0,8	0,8	0,8
60°	4,8	4,7	4,8
85°	1,1	1,1	1,1

Prema vrijednostima sjaja iz norme ISO 2813, za raspon od 0-10 jedinica GU, sjaj premaza spada u grupu mat.

Pomoću RAL-a (slika 39.) određena je nijansa premaza oznake RAL 7033.

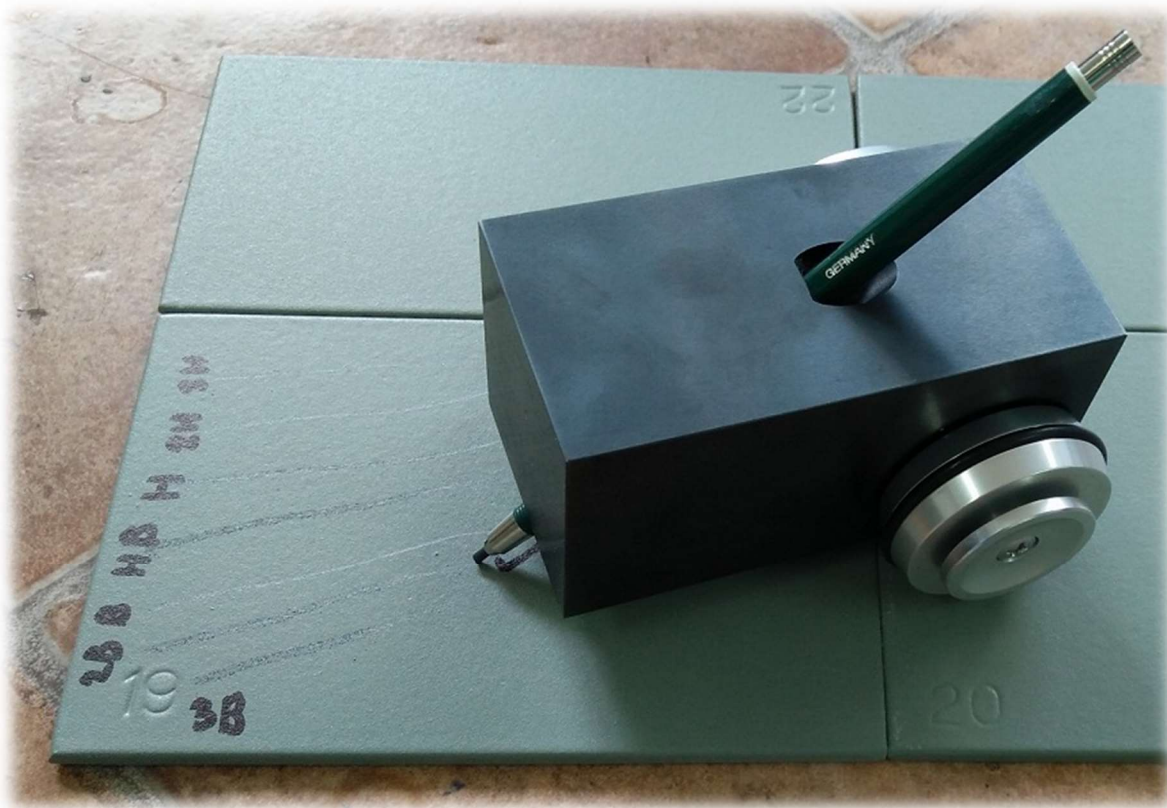


Slika 39. Određivanje nijanse premaza prema RAL-u [10]

10.6. Ispitivanje tvrdoće premaza

Jedan od zahtjeva koji se postavlja na premaz kojim se antikorozivno zaštićuje metalna površina je njegova tvrdoća. Tvrdoća ima odlučujući utjecaj na otpornost (čvrstoću) premaza na ogrebotine. Oštećenom premazu pada kvaliteta i vijek trajanja antikorozivne zaštite metalne površine [15]. Ispitivanje je provedeno sukladno normi HR EN ISO 15184:2013. Za ispitivanje se najčešće koristi test olovkom (Woff Wilborn metoda) različitih tvrdoća mina u rasponu od 6H (najtvrđe) do 6B (najmekše): 6H-5H-4H-3H-2H-H-F-HB-B-2B-3B-4B-5B-6B. Oprema za mjerenje se sastoji od 14 olovaka zajedno sa instrumentom Simex koji omogućava da se olovka drži pod kutom od 45° u odnosu na površinu. Ispitivanje počinje uporabom olovke najveće tvrdoće i nastavlja se prema mekšoj. Prva olovka koja ne ostavi trag na površini, označava tvrdoću prevlake. Olovke od 3B do 6B su meke, od 2B do 2H su srednje, a od 3H do 6H su tvrde.

Ispitivanje prikazano na slici 40. je provedeno na uzorku 19.



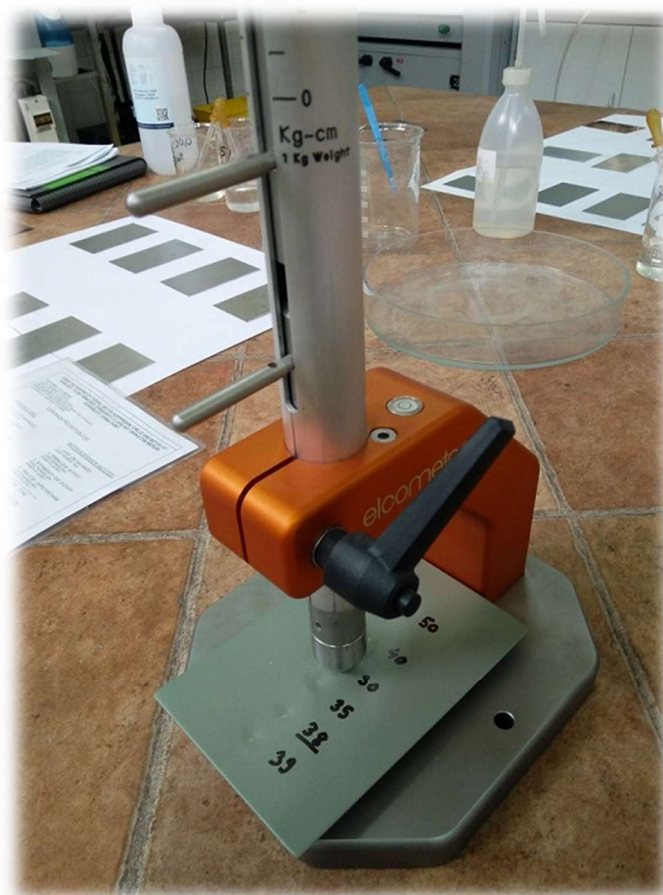
Slika 40. Ispitivanja tvrdoće [10]

Rezultat ispitivanja: Olovka 2B prva nije ostavila trag na površini što znači da premaz spada u meke premaze.

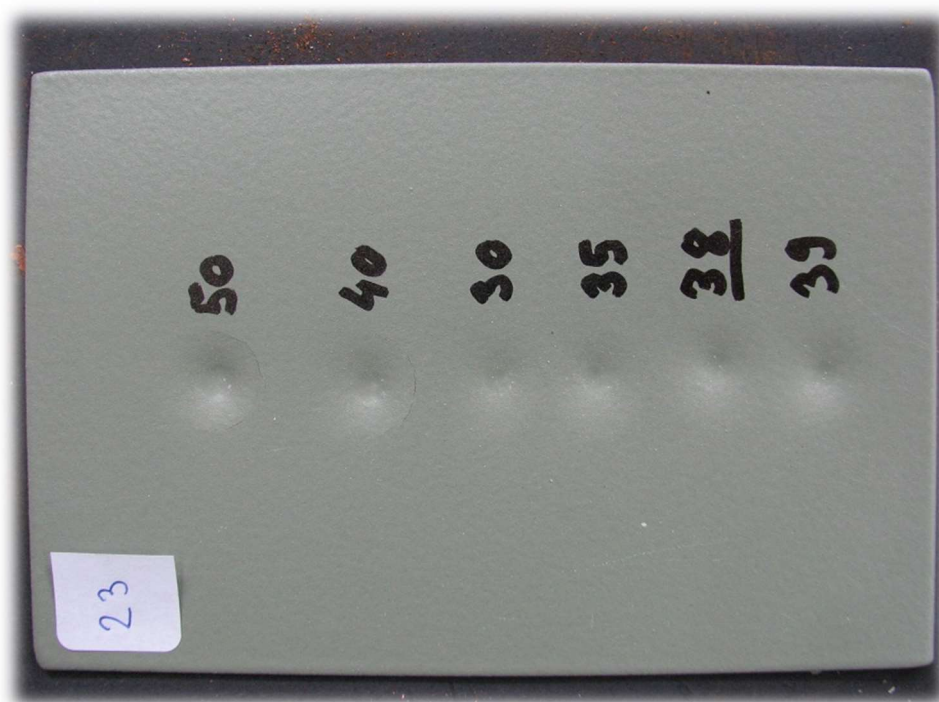
10.7. Ispitivanje otpornosti premaza na udar

Viša tvrdoća tvrdih i viša elastičnost mekših premaza daju bolju otpornost na mehanička oštećenja prilikom transporta ili upotrebe proizvoda. Zbog toga se otpornost premaza na mehanička oštećenja dodatno ispituje udarom tvrdog predmeta pomoću alata Elcometer 1615 prikazanog na slici 41. Ispitivanja se provode prema normi HRN EN ISO 6272.

Valjkasti uteg mase 1000 ± 5 g pušta se da slobodno pada i udara u alat oblika polukugle okrenute prema ispitnom utorku. Ispitivanja se ponavljaju dok se ne otkrije najviša visina spuštanja utega na kojoj se ne pojavi pucanje ili ljuštenje premaza. Pukotine se vide na slici 42. za visine 50 i 40 cm, iako se pukotina za visinu 39 cm na slici ne vidi, ona je vidljiva kada se gleda pod drugim kutom.



Slika 41. Uređaj Elcometer 1615 za mjerenje otpornosti na udar [10]



Slika 42. Prikaz uzorka 10 nakon ispitivanja otpornosti na udar [10]

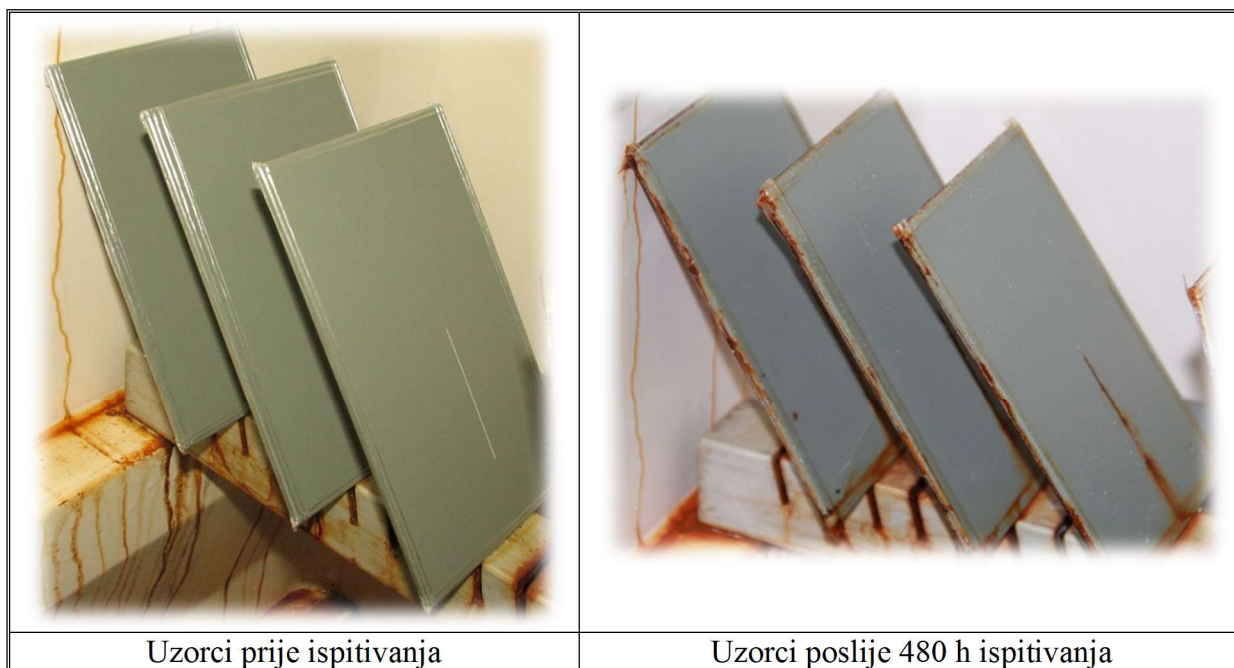
Na visini od 38 cm i niže nije došlo do pojave pukotine nakon spuštanja utega.

10.8. Ispitivanje u slanoj komori

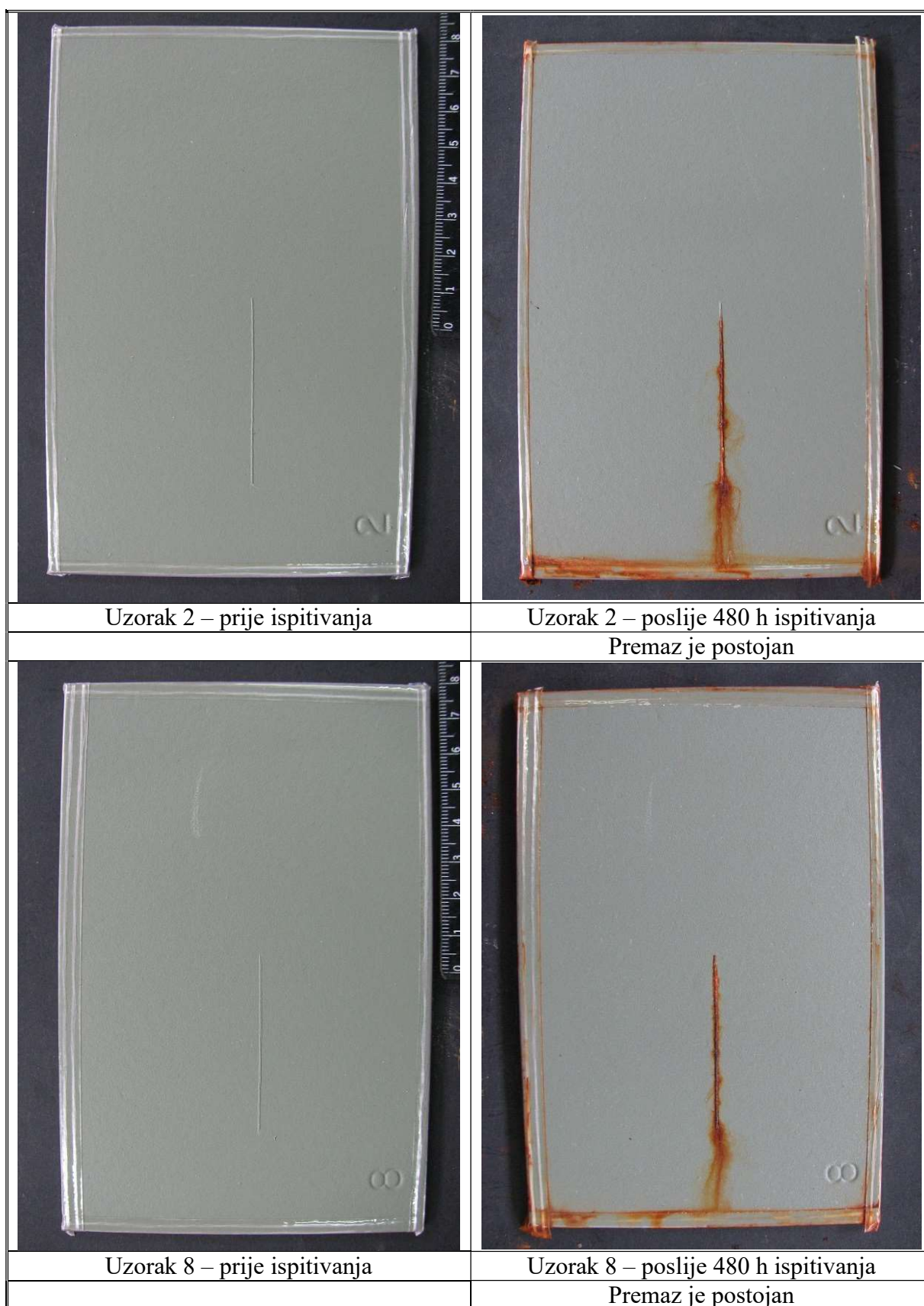
Ispitivanjima u slanoj komori simulira se izlaganje morskoj atmosferi pri čemu se razrijeđena 5 % otopina NaCl raspršuje u vidu magle na ispitivane uzorke. Ispitivanja se provode sukladno normi HRN EN ISO 9227:2012. Korištena je slana komora Ascott, model S450 (slika 43.). Ispitivanje je trajalo 480 h (~20 dan), što odgovara trajnosti zaštite iznad 15 godina, koje je definirano normom ISO 12944-6 za klasu korozije okoliša C3. Ispitivanje je provedeno na uzorcima 2, 8 i 13 (slika 44.).



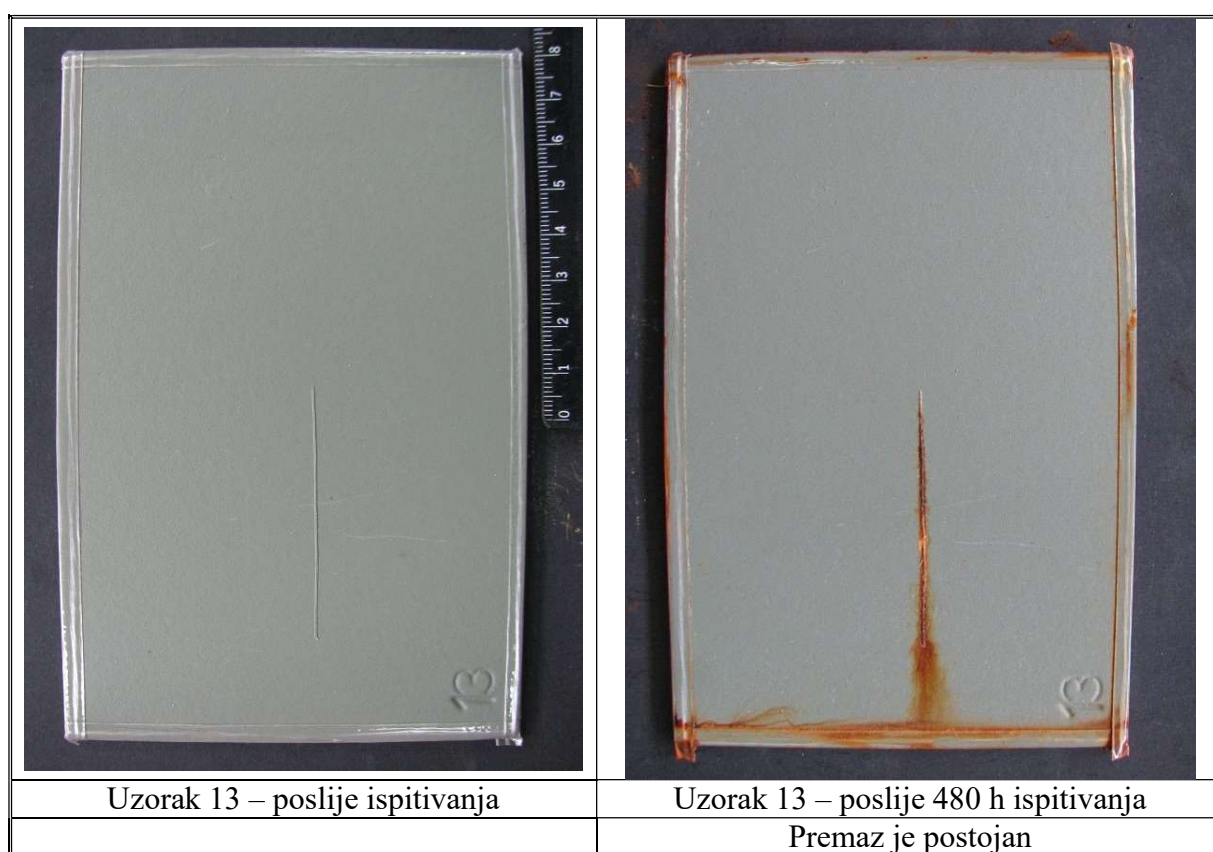
Slika 43. Slana komora Ascott S450, Laboratorij za zaštitu materijala, FSB Zagreb [10]



Slika 44. Prikaz položaja uzoraka 2, 8 i 13 u slanoj komori [10]



Slika 45. Prikaz uzoraka 2 i 8 nakon 480 sati ispitivanja u slanoj komori [10]



Slika 46. Prikaz uzorka 13 nakon 480 sati ispitivanja u slanoj komori [10]

10.8.1. Ispitivanje širenja korozije ispod premaza

Ispitivanje se provodi sukladno normi ISO 7253. Prije ispitivanja u slanoj komori, na uzorke se ureže skalpelom ravan rez duljine 5 cm. Nakon ispitivanja u slanoj komori, premaz se uklanja i mjeri širina površine na osnovnom materijalu koji je korodirao. Jednadžba (6) za računanje širine korozije ispod premaza i uvjet. Rezultati ispitivanja su prikazani u tablici 8.

$$M = \frac{c-w}{2} < 1 \quad (6)$$

Tablica 8. Rezultati ispitivanja širenja pukotine ispod premaza

Rezultati ispitivanja [mm]			
Uzorak	c	w	M
8	0,9	0,4	0,25
2	0,8	0,4	0,2
13	0,8	0,4	0,2

Svo troje ispitanih uzoraka je zadovoljilo uvjet.

10.9. Ispitivanje u vlažnoj komori

Ispitivanjima u vlažnoj komori (slika 47.) simulira se ponašanje materijala u vlažnoj i toploj atmosferi uz kondenziranje vode. Vlažna komora ima podnu tavu za prihvatanje vode čijim se zagrijavanjem temperira prostor za ispitivanje. Temperatura pri ispitivanju je 40 ± 3 °C, a relativna vlažnost zraka je oko 100 % s orošavanjem uzoraka. Ispitivanja se provode sukladno normi HRN EN ISO 6270-2:2007.

Ispitivanje je trajalo 240 h (~10 dan), što odgovara trajnosti zaštite iznad 15 godina, koje je definirano normom ISO 12944-6 za klasu korozije okoliša C3. Ispitivanje je provedeno na uzorcima 14, 16 i 17 (slika 43).



Slika 47. Vlažna komora i uzorci u njoj [10]

Na slici 48. prikazani su pripremljeni uzorci 14, 16 i 17 za ispitivanje u vlažnoj komori.



Slika 48. Prikaz pripremljenih uzoraka 14, 16 i 17 za vlažnu komoru [10]



Slika 49. Prikaz uzoraka 14, 16 i 17 nakon 240 h ispitivanja u vlažnoj komori [10]

Premaz se pokazao postojan nakon 240 sati ispitivanja u vlažnoj komori što je vidljivo na slici 49. Na površini uzoraka uočene su mrlje od sušenja vodenih kapljica.

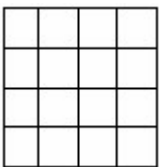
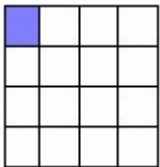
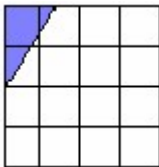
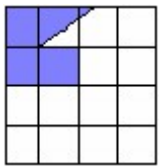
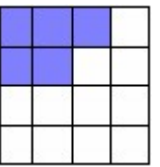
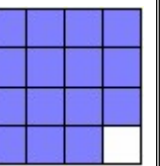
10.10. Ispitivanje prionjivosti premaza – "Cross-cut" test

Prianjanje sloja premaza na podlogu određuje se metodom mrežice (Cross-cut test) prema HRN EN ISO 2409:2013. Ispitivanje se sastoji u tome da se u sloj premaza do podloge pomoćnim alatom i skalpelom (slika 50.) ureže šest horizontalnih i okomitih ureza (kvadratna mreža). Odgovarajućom četkom se uz lagani pritisak prijeđe preko mrežice u oba smjera, prilijepi ljepljiva vrpca i nakon otkidanja vrpce promatra se postotak slobodne površine. Ocjenjivanje stupnja prionjivosti premaza određuje se promatranjem prianjanja urezane mrežice na podlogu (tablica 9.).



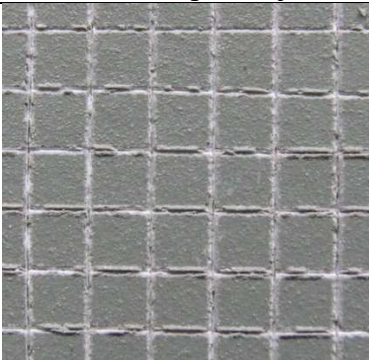
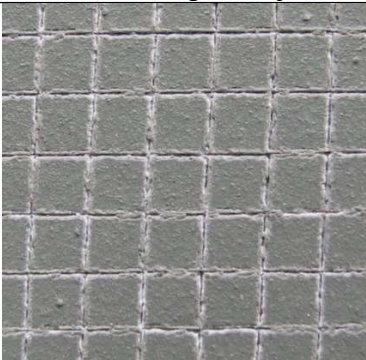
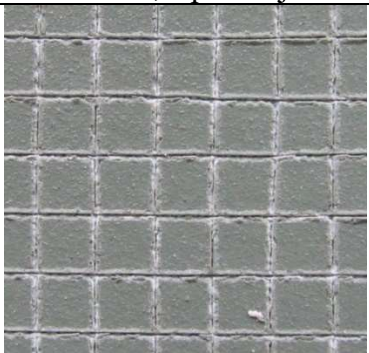
Slika 50. Postupak ispitivanja prionjivosti premaza [10]

Tablica 9. Ocjene prionjivosti

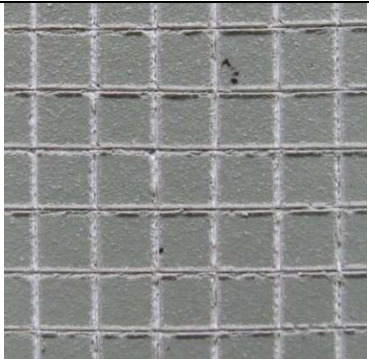
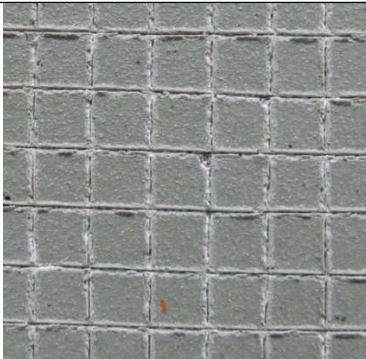
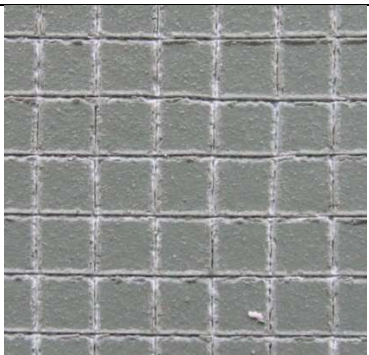
Izgled površine	 bez ljuštenja sloja	 5 % odvojene površine	 5-15 % odvojene površine	 15-30 % odvojene površine	 > 30 % odvojene površine	 > 65 % odvojene površine
Ocjene prianjanja ISO 2409	0	1	2	3	4	5
Ocjene prianjanja DIN 2409	G0	G1	G2	G3	G4	G5

Rezultati ispitivanja prionjivosti prikazani su u tablici 10. za uzorak 12 na kojem nisu bila vršena ubrzana ispitivanja. U tablici 11. prikazani su rezultati nakon ispitivanja u slanoj komori, a u tablici 12. nakon ispitivanja u vlažnoj komori.

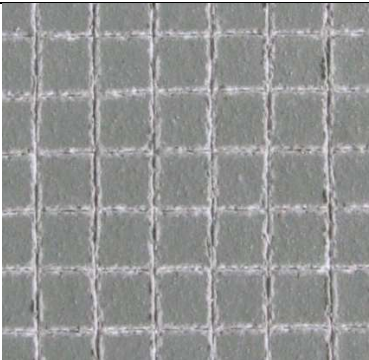
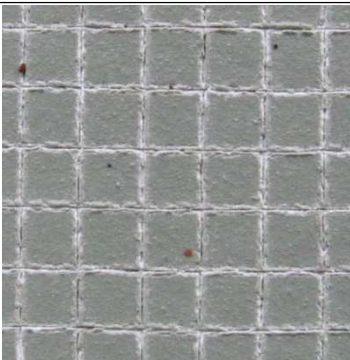

Tablica 10. Ispitivanje prionjivosti, uzorak 12, etalon [10]

Uzorak 2, ispitivanje 1.		Uzorak 2, ispitivanje 2.	
			
Uzorak 2, ispitivanje 3.		Ocjenjivanje uzorka	
		<p>Ispitivanje 1. – ocjena 0 Ispitivanje 2. – ocjena 1 Ispitivanje 3. – ocjena 0</p>	

Tablica 11. Ispitivanje prionjivosti, uzorci 2, 8 i 13, nakon slane komore [10]

Uzorak 2		Uzorak 8	
			
Uzorak 3		Ocjenjivanje uzorka	
		<p>Uzorak 2 – ocjena 0 Uzorak 8 – ocjena 1 Uzorak 13 – ocjena 0</p>	

Tablica 12. Ispitivanje prionjivosti, uzorci 14, 16 i 17, nakon vlažne komore [10]

Uzorak 14		Uzorak 16	
			
Uzorak 17		Ocjenjivanje uzorka	
		<p>Uzorak 14 – ocjena 0 Uzorak 16 – ocjena 0 Uzorak 17 – ocjena 0</p>	

10.11. Ispitivanje vlačne čvrstoća premaza – "Pull-off" test

Ispitivanje vlačne čvrstoće premaza, tzv. Pull-off test, provedeno je u skladu s normom HRN EN ISO 4624. Ovim postupkom određuje se vlačna čvrstoća premaza. Minimalni zahtjev za izdržljivost premaza prema normi je 5 MPa. Do odvajanja dolazi na mjestu najslabije prionjivosti, što može biti u samom premazu, između slojeva premaznog sustava i između površine zaštićenog materijala i premaza.

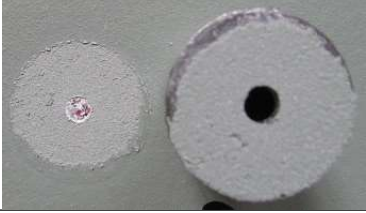




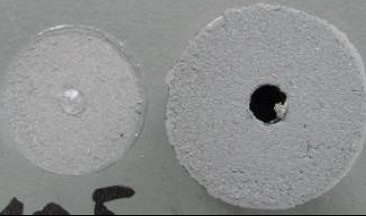

Za izvođenje ispitivanja korišten je uređaj Elcometer 108 prikazan na slici 51., a rezultati ispitivanja su prikazana u tablici 13.

Sva ispitivanja su zadovoljila zahtjev od minimalno 5 MPa, raspon prionjivosti bio je između 8,9 do 10,5 MPa.



Slika 51. Uređaj Elcometer 108 za ispitivanje vlačne čvrstoće premaza [10]

Tablica 13. Rezultati ispitivanja vlačne čvrstoće premaza

Uzorak 12, etalon		
		
9,66 MPa		
Uzorak 2, slana komora	Uzorak 8, slana komora	Uzorak 13, slana komora
		
10,08 MPa	8,90 MPa	8,97 MPa
Uzorak 14, vlažna komora	Uzorak 16, vlažna komora	Uzorak 17, vlažna komora
		
9,78 MPa	10,5 MPa	10,27 MPa

10.12. Analiza rezultata

Provedenim laboratorijskim ispitivanjima potvrđena je učinkovitost zaštite odabranog sustava premaza za tražene uvjete korozivnosti klase C3 i srednjetrojnom vijeku zaštite M.

Hrapavost sačmarene površine – srednja vrijednost hrapavosti površine iznosi 69 μm što zadovoljava zahtjeve proizvođača premaza.

Debljina premaza – srednje vrijednosti debljine premaza su preko minimalne granice od 160 μm , u rasponu od 172,2 – 192,2 μm . Na svakom uzorku vršeno je deset mjerenja, uzorci 15 i 20 u jednom mjerenju su bili u rasponu od 151 – 155 μm , što je prihvatljivo.

Sjaj premaza – premaz spada u skupinu mat premaza što je poželjno svojstvo s obzirom na to da su takvi proizvodi uglavnom na otvorenom, te reflektiraju sunčevu svjetlost u svim smjerovima. Određena je nijansa premaza oznake RAL 7033 prema RAL karti.

Tvrdoća premaza – premaz spada u meke prevlake tvrdoće 3B. Karakteristika takvih prevlaka jest dobra žilavost i veća otpornost na mehaničke udarce i temperaturnog rastezanja i skupljanja.

Otpornost premaza na udar – premaz se pokazao otporan na udar pri visini od 38 cm.

Ispitivanje u slanoj komori – premazi su otporni na slanu, agresivnu okolinu te nema znakova korozije. Kod ispitivanja širenja korozije ispod premaza također je zadovoljilo uvjet kod sva tri ispitna uzorka.

Ispitivanje u vlažnoj komori – premazi su otporni na vlažnu okolinu te nema znakova korozije.

Prionjivost premaza – prionjivost je zadovoljavajuća, kod etalona s ocjenama 0 za dva uzorka i 1 za jedan uzorak. Uzorci ispitani u vlažnoj komori imaju ocjenu 0. Nakon ispitivanja u slanoj komori dva uzorka imaju ocjenu 0, dok jedan ima ocjenu 1 zbog jednog otkinutog vrha kvadrata.

Vlačna čvrstoća premaza – ispitivanja su zadovoljila uvjet i svi rezultati ispitivanja su preko 5 MPa.

11. ZAKLJUČAK

Korozija je danas jedan od važnijih čimbenika svjetske krize materijala i energije, uzrok je znatnih gubitaka u gospodarstvu svake zemlje. Svjedoci smo mnogih katastrofa koje su uzrokovane korozijom, npr. potonuća brodova, rušenje mostova itd. Zbog svega navedenog prema zaštiti od korozije treba se pristupiti profesionalno.

U gradskoj atmosferi opći konstrukcijski čelik koji se koristi za izradu energetskih transformatora korodira brzinom od 0,2 mm/god. Materijal je upotrebljiv ako korodira manjom brzinom od 0,1 mm/god. U protivnom, potrebno je primijeniti odgovarajuću metodu zaštite od korozije.

Energetski transformatori vrlo su bitni dijelovi električnih mreža. Zbog toga elektroprivredna društva imaju jake mjere održavanja. Pravilan izbor i aplikacija sustava premaza produžava vijek trajanja proizvoda i smanjuje ekonomske troškove za održavanje.

Sustav premaza koji se sastoji od kombinacije epoksi premaza kao temeljnog i međupremaza, te poliuretanskog završnog premaza pokazuje se kao odlična zaštita kućišta energetskih transformatora od atmosferske korozije, što je potvrđeno rezultatima ispitivanja u eksperimentalnom dijelu.

Epoksidni premazi daju dobru prionjivost, čvrsti su i glatki, dok poliuretanski završni premaz štiti od ultraljubičastih zraka sunca, abrazije i daje sjajan izgled transformatoru.

LITERATURA

- [1] Vlastita arhiva fotografija
- [2] Juraga I., Alar V., Stojanović, I.: *Korozija i zaštita premazima*, FSB Zagreb, 2014.
- [3] Esih I., Dugi Z.: *Osnove površinske zaštite*, FSB Zagreb, 2003.
- [4] Alar V.: *Predavanja iz kolegija toplinska obrada i površinska zaštita*, FSB Zagreb, 2008.
- [5] Esih I., Dugi Z.: *Tehnologija zaštite od korozije II*, Školska knjiga Zagreb, 1992.
- [6] Stupnišek-Lisac E.: *Korozija i zaštita konstrukcijskih materijala*, FKIT, 2007.
- [7] Charles G. M.: *Corrosion prevention by protective coatings*, NACE, 1999.
- [8] Esih I., Dugi Z.: *Tehnologija zaštite od korozije I*, Školska knjiga Zagreb, 1990.
- [9] Gessner H.-J.: *Coating Material – Chemical Technical Solutions for Transformers and Radiators*, Chemischen Industrie Erlangen, Erlangen Germany, 2009.
- [10] D. Kjernsmo, K. Kleven, J. Scheie: *Corrosion protection*, Hempel A/S, 2003.
- [11] NACE International: *Coating and Linings for Immersion Services*, NACE, 1998.
- [12] Esih I.: *Nanošenje i ispitivanje prevlaka i značenje ispitivanja zaštitnih prevlaka*, Seminar - Mjerenje debljine prevlaka, Zbornik radova, FSB Zagreb, ožujak 2000.
- [13] Rački-Weihnacht N.: *Boje i lakovi*, Chromos boje i lakovi d.d., Zagreb, 2004.
- [14] Ćurković L.: *Kemijska postojanost materijala*,
http://www.fsb.hr/zavod_za_materijale/download/e32ebe7d7fa8105ac27f4d41122c279e.pdf [24.06.2011.]
- [15] B. Brener: *Kontrolno-mjerni instrumenti i pomagala u djelatnosti antikorozivne zaštite*, Zagreb, 1985.
- [16] HRN EN ISO 12944-1 do 8, *Boje i lakovi – Zaštita od korozije čeličnih konstrukcija zaštitnim sustavom boja*
- [17] HRN EN ISO 8501-1:2007, *Priprema čeličnih podloga prije nanošenja boja i srodnih proizvoda – Vizualna procjena čistoće površine – 1. dio: Stupnjevi hrđanja i stupnjevi pripreme nezaštićenih čeličnih površina i čeličnih površina nakon potpunog uklanjanja prethodnih prevlaka*
- [18] Podloge za vježbe, Mehanizmi zaštite od korozije, Katedra za zaštitu materijala, FSB Zagreb, 2016.

PRILOZI

- I. Tehnička specifikacija primarnog premaza
- II. Tehnička specifikacija međupremaza
- III. Tehnička specifikacija završnog premaza
- IV. CD-R disc

I. Tehnička specifikacija primarnog premaza

Technisches Datenblatt
Technical data sheet

2-K-Beschichtungsstoffe
2-Component-materials



1. Allgemeine Stoffangaben General data		Bindemittel Binder	Register Register
		EP	7.2
Bezeichnung Name of product	CHING-EP-Primer EMC 182 white K-DB		
Härter Hardener	CHING-EP hardener M 038		
Mischungsverhältnis Mixing ratio	100 : 15 Massenteile K I : K parts by weight C I : C II 3 : 1 Volumenteile K I : K II parts by volumen C I : C II		
Art Generic type	two component epoxy primer for transformer inside and outside coatings and equipments		
Einsatzgebiet Field of application	inside and outside coating of transformer tanks		
Lieferbare Farbtöne Available colours	white, other colours by request		
2. Zusammensetzung* Composition*			
Bindemittelbasis Binder	two component epoxy resin		
Pigmentbasis Pigments	zinc phosphate, pigments and tenders		
Lösemittel Solvent	aromatics, alcohols		
3. Lacktechnische Daten Technical data			
Glanzgrad Gloss	flat	Viskosität Viscosity	40 - 70 DIN6-sec.
Dichte Density	1,64 g/cm³	Topfzeit Pot-life	6 - 8 h 10 kg tin at 20 °C 3h at 30°C
Festkörpervolumen Solids by volume	354 cm³/kg	theoretischer Verbrauch theoretical consumption	226 g / m²
Festkörpervolumen Solids by volume	58 Vol %		
Theoretische Ergiebigkeit Theoretical coverage	5,9 m² / kg at 60 µm 4,4 m² / kg at 80 µm		
Temperaturbeständigkeit Temperature resistance	approx. 120 – 130 °C dry climate		

Remarks: Prior to use, components I and II must be mixed thoroughly as in the ratio above.

4. Trockenzeiten
Drying time

TG 1 staubtrocken
dust – free drying time

:

1 hrs

bei 80 µm Normklima
at 80 µm standard climate

TG 5 griffest
dry to touch

:

8 hrs

bei 80 µm Normklima
at 80 µm standard climate

TG 7 mech. belastbar
mechanical stress
resistance

:

18 hrs

bei 80 µm Normklima
at 80 µm standard climate

überarbeitbar nach
recoating

:

6 – 8 hrs
by spraying

with the same material or compatible topcoat

The drying of epoxy resin systems is largely dependent on temperature, with adequate crosslinkage forming after approximately 7 days at a temp. of 20 °C, provided the solvent is able to evaporate.

5. Verarbeitungshinweise
Application

Oberflächenvorbereitung
Surface preparation

:

prepared in according to DIN EN ISO 12944
stainless-steel, galvanized steel and aluminium after sweep blast-cleaning

Streichen
Brush application

:

Rollen
Roller

:

Fluten
Flow coating

:

Hochdruckspritzen
High pressure spraying

:

ca. DIN-4 Sek.
approx. DIN-4 sec.

50 - 70

Verdünnungszugabe
thinner ratio

10 - 15 %
EM 03 FL or EM 01 thinner

Druck (bar)
pressure

4 - 5

Düse (mm)
nozzle

1,5 - 2,5

Airless-Spritzen
Airless spraying

:

as delivered

approx 3 %
EM 03 FL or EM 01 thinner

180 – 220

0,31 - 0,48

Andere Applikationen
Other applications

:

Luft-/ Objekt-Temperatur
Air-surface-temperature

:

mind. 7 °C, maximal 35°C
minimum 7 °C, maximum 35°C

Taupunkt
Dew point

:

mind. 3° C unter Luft- und Objekttemperatur
at least 3° C below air- and subject temperature

Empfohlene Schichtdicke
Recommended thickness

:

60 – 80 µm

6. Sonstiges
Other information

Lagerstabilität
Shelf life
Storage
Remark

:

12 month in the original tin, store in a cool , frost free place

In the original container in a cool place but protected from frost. In the case of objects with an unfavourable geometry, and poor air circulation; e.g. covered surfaces, increased solvent retention must be expected, so that drying times and workover intervals may vary

weitere Hinweise
further information

:

siehe Register
see register

:

* bezogen auf den Farbton
referring to colour white

II. Tehnička specifikacija među premaza

Technisches Datenblatt
Technical data sheet

2-K-Beschichtungsstoff
2-pack-material



1. Allgemeine Stoffangaben General data				Bindemittel Binder	Register Register
				EP	3
Bezeichnung name of product	CHING-EP-micaceous iron intermediate coat thickness 80 µm EMD 30 grey TR				
Härter hardener	CHING-EP hardener M 037				
Mischungsverhältnis mixing ratio	100 : 11 Parts by weight C I : C II 5 : 1 Parts by volume C I : C II				
Art product description	Economical 2-pack epoxy resin based micaceous iron intermediate-/ top coat for heavy corrosion prevention				
Einsatzgebiet typical uses	industrial- and airport-buildings, warehouses, car parking, chemical units, off-shore area, tank units, power station areas, transformer station etc.				
Lieferbare Farbtöne available colours	grey TR				
2. Zusammensetzung* Composition*					
Bindemittelbasis binder	Epoxy				
Pigmentbasis pigments	micaceous iron and colour pigments				
Lösemittel solvent	aromatics, glycolether				
3. Lacktechnische Daten Technical data					
Glanzgrad gloss	dim		Viskosität viscosity	50 - 70	DIN-6-sec.
Dichte density	1,55	g/cm³	Topfzeit pot-life	6 - 8 h	10 kg barrel at 20 °C
Festkörpervolumen solids by volume	391	cm³/kg	theoretischer Verbrauch theoretical consumption	204	g / m²
Festkörpervolumen solids by volume	61	Vol %			
Theoretische Ergiebigkeit theoretical spreading rate	ca. 4,9	m² / kg at 80 µm			
Temperaturbeständigkeit temperature resistance	approx 120 °c dry load				

4. Trockenzeiten drying time				
TG 1 staubtrocken dust – dry	:	approx. 1 h	bei 80 µm Normklima at 80 µm standard climate	
TG 5 griffest dry to touch	:	approx. 6 h	bei 80 µm Normklima at 80 µm standard climate	
TG 7 mech. belastbar mechanical stress resistance	:	approx. 12 h	bei 80 µm Normklima at 80 µm standard climate	
überarbeitbar nach recoating	:	5 - 6 h	with itself or a qualified topcoat	
5. Verarbeitungshinweise Application				
Oberflächenvorbereitung surface preparation	:	qualified primer in according to DIN EN ISO 12944		
Streichen application by brush	:	as delivered		
Rollen application by roller	:	as delivered; minor layer thickness has to be expected		
Fluten flow coating	:			
		ca. DIN – 4 Sek. approx. DIN – 4 sec.	Verdünnungszugabe thinning ratio	Druck pressure
Hochdruckspritzen high pressure spraying	:	40 - 70	approx. 10 % EM 01 thinner	4 – 5
Airless-Spritzen airless spraying	:	as delivered	approx. 5 % EM 01 thinner	140 - 200
andere Applikationen other applications	:	--		
Luft-/ Objekt-Temperatur air-surface-temperature	:	mind. 10°C, maximal 35°C minimum 10°C, maximum 35°C		
Taupunkt dew point	:	mind. 3° unter Luft- und Objekttemperatur at least 3° below air- and subject temperature		
empfohlene Schichtdicke recommended thickness	:	80 µm		
6. Sonstiges other information				
Lagerstabilität shelf life	:	12 month; original packing, store cool but free of frost		
weitere Hinweise further information	:	siehe Register see register	* bezogen auf den Farbton referring to colour grey TR	

III. Tehnička specifikacija završnog premaza

Technisches Datenblatt
Technical data sheet

2-K-Beschichtungsstoff
2-pack-material



1. Allgemeine Stoffangaben General data		Bindemittel Binder	Register Register
		PUR	3
Bezeichnung name of product	: CHING-PUR-Mica-topcoat dryfilm thickness 80 µm ADD 43		
Härter hardener	: CHING-PUR hardener D 103		
Mischungsverhältnis mixing ratio	: 90 : 10 Parts by weight C I : C II		
Art product description	: Polyurethane topcoat with excellent durability chemical resistance and colour stability		
Einsatzgebiet typical uses	: High performance topcoat for protective coatings systems for steel constructions with high chemical or mechanical exposure.		
Lieferbare Farbtöne available colours	: DB-, RAL-, NCS-, British Standard -, Munsell-, AS-, Federal Standard- and special colors		
2. Zusammensetzung* Composition*			
Bindemittelbasis binder	: Polyurethane		
Pigmentbasis pigments	: colour pigments and special barrier pigments, miox		
Lösemittel solvent	: aromatic hydrocarbon		
3. Lacktechnische Daten Technical data			
Glanzgrad gloss	: < 15 inclined at an angle of 60 °	Viskosität viscosity	40-70 : DIN-6-sec.
Dichte density	: 1,53 ± 0,1g/cm³	Topfzeit pot-life	4-6 h : 10 kg barrel at 20 °C
Festkörpervolumen solids by volume	: 368 cm³/kg	theoretischer Verbrauch theoretical consumption	: 217 g / m²
Festkörpervolumen solids by volume	: 56 Vol %		
Theoretische Ergiebigkeit theoretical spreading rate	: 4,6 m² / kg at 80 µm		
Temperaturbeständigkeit temperature resistance	: 120 °C dry load		

